

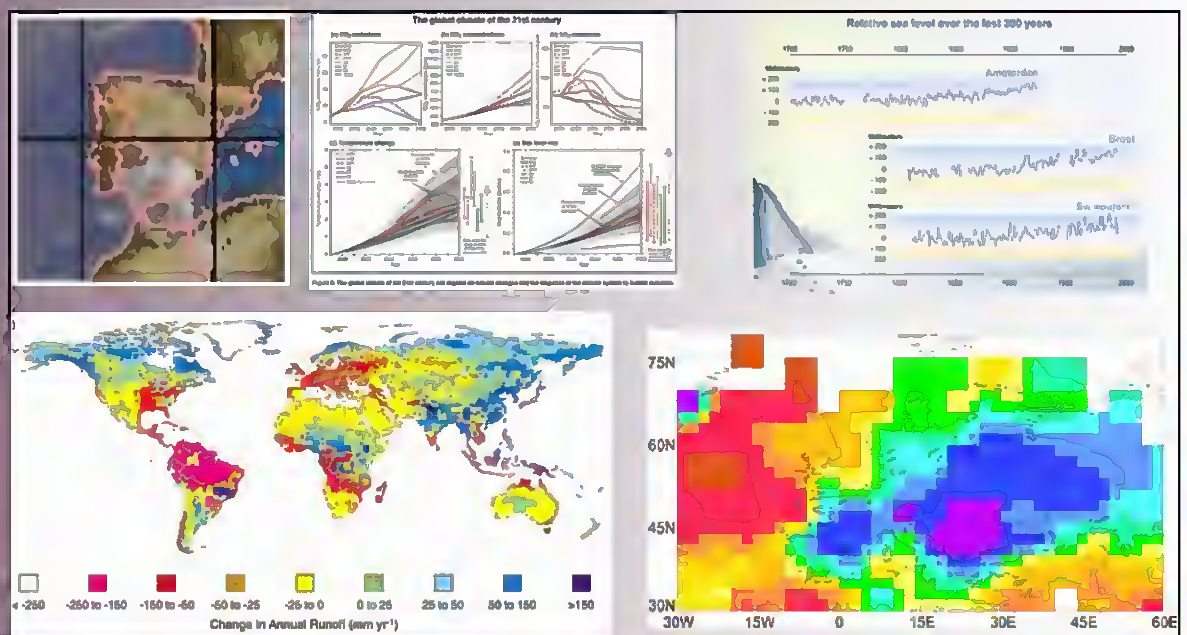


MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



### FASE I A. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Fase I-a) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## **EXPOSICIÓN DE MOTIVOS**

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## **OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO**

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

#### **FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

#### **FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

#### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

#### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

#### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsible cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Fase I-a:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Fase I-a. Recopilación de la información.**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**ÍNDICE**

---



## Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1.1
Capítulo 2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS VARIABLES GEOFÍSICAS RELEVANTES PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.....	2.1
Capítulo 3. RECOPIACIÓN DE LAS BASES DE DATOS.....	3.1
3.1. Datos atmosféricos.....	3.1
3.2. Datos de oleaje:.....	3.2
3.2.1. Medidas instrumentales.....	3.2
3.2.2. Modelos de reanálisis.....	3.4
3.2.3. Modelos de predicción para escenarios de cambio climático.....	3.7
3.3 Datos de nivel del mar.....	3.7
3.3.1. Datos históricos.....	3.7
3.3.2. Predicciones de ascenso del nivel del mar.....	3.9
3.4. Datos de subsidencia.....	3.10
3.5. Datos de caudal fluvial.....	3.10
3.5.1. Datos históricos.....	3.10
3.5.2. Modelos de predicción para escenarios de cambio climático.....	3.10
3.6. Datos de caudal sólido.....	3.12
Capítulo 4. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS BASES DE DATOS.....	4.1
4.1. Datos atmosféricos.....	4.1
4.2. Datos de oleaje.....	4.1
4.3. Datos de nivel del mar.....	4.2
4.4. Datos de subsidencia.....	4.3
4.5. Datos de caudal fluvial.....	4.3
4.6. Datos de caudal sólido.....	4.3







**Capítulo 5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA..... 5.1**

- 5.1 Panel intergubernamental sobre cambio climático..... 5.1
- 5.2 UNESCO..... 5.2
- 5.3 UNEP (United Nations Environment Program)..... 5.3
- 5.4 DEFRA: Department for environment food and rural affairs (UK)..... 5.3
- 5.5 OECD: Organisation for economic development and co-operation ..... 5.3
- 5.6 EPA: Environmental protection agency (USA) ..... 5.4
- 5.7 ANZECC: Australian and new zealand environment and conservation council.... 5.5
- 5.8 CCME: Canadian council of ministers of the environment ..... 5.5
- 5.9 Conclusiones ..... 5.6

**Capítulo 6. REFERENCIAS ..... 6.1**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---



## 1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta la información relativa a la recopilación de la información que se ha considerado recoger para cumplir los objetivos del proyecto.

Para realizar el estudio de los efectos del cambio climático en la costa, se deben analizar las tendencias de los agentes forzadores del litoral; esto es, los cambios en el nivel medio del mar, en la dinámica marina y en la dinámica sedimentaria. Actualmente, los dos tipos de análisis que se realizan consisten en:

- (a) Apoyarse en las tendencias históricas a lo largo del siglo XX, para poder realizar una extrapolación a un año horizonte de los cambios (en este estudio se ha considerado como horizonte el año 2050). Para el primer tipo de análisis (tendencias históricas a lo largo del siglo XX), es claro que cuanto mayor sea la serie histórica, mayor será la fiabilidad (significación estadística), de la predicción de la tendencia. Por lo tanto, lo deseable es disponer de bases de datos de al menos 40-50 años, para poder predecir con alguna garantía de éxito lo que sucederá en el año horizonte 2050. Es importante señalar que esta extrapolación asume que la tendencia de variación de las variables geofísicas es constante hasta el año horizonte.
- (b) Realizar prognosis de cambio (en principio para el horizonte del año 2100), para distintos escenarios de cambio climático contemplados en el tercer informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001).

Cabe señalar que, dado que el objetivo es evaluar los cambios en la costa y que los agentes forzadores provienen de diferentes campos de la ciencia, el nivel de estudio y de disponibilidad de las bases de datos es muy variable, para lo cual ha habido que realizar un conjunto de hipótesis de trabajo con el fin de “homogeneizar” las bases de datos de cada variable geofísica.

La estructura del documento es la siguiente: primeramente, se hace un análisis y selección de las variables geofísicas más relevantes para el estudio del cambio climático en la costa. En segundo lugar, se presenta la recopilación de las bases de datos analizadas. Posteriormente, se realiza una evaluación y selección de las bases de datos que se van a utilizar en este proyecto. Finalmente, se ha realizado una búsqueda de información de los índices o indicadores de cambio climático en la costa existentes en el estado del conocimiento.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS VARIABLES  
GEOFÍSICAS RELEVANTES PARA EL  
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

---



## **2. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LAS VARIABLES GEOFÍSICAS RELEVANTES PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

Una de las primeras tareas, ha consistido en realizar un análisis exhaustivo de los posibles efectos del cambio climático sobre las zonas costeras, ya que sólo después de este análisis, se puede realizar una adecuada selección de aquellas variables o magnitudes geofísicas que es necesario analizar con el fin de establecer la existencia o no de dichos efectos. Dada la infinidad de variables geofísicas involucradas en la problemática analizada, ha sido necesario partir de un profundo análisis para evaluar adecuadamente las bases de datos históricos susceptibles de ser recopilados; la necesidad o no de generar nuevas bases de datos y el tipo de análisis más adecuado para conseguir alcanzar los objetivos establecidos para cada una de las fases.

Después de este análisis, se ha considerado necesaria la información histórica relativa a: datos atmosféricos, datos de oleaje, datos de nivel del mar, datos de subsidencia, datos de caudal fluvial y datos de caudal sólido.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 3. RECOPILACIÓN DE LAS BASES DE DATOS**

---



### 3. RECOPIACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

En general, existen dos tipos de fuentes de datos a partir de los cuales se puede obtener la información requerida: datos provenientes de observaciones o datos generados numéricamente. Desafortunadamente, los primeros presentan una gran cantidad de problemas. En primer lugar, las series temporales no son, en general, suficientemente largas como para obtener la información requerida. Asimismo, dichas bases de datos no tienen la homogeneidad espacial requerida o no han sido sometidas al control de calidad necesario para garantizar que los resultados obtenidos a partir de los mismos puedan ser fiables. Y finalmente, de algunas de estas magnitudes consideradas ni tan siquiera existen registros. Por todo ello, una buena alternativa es complementar los datos de observaciones con datos generados numéricamente.

La generación de datos a partir de modelos ya sea atmosféricos, de oleaje, corrientes o transporte, permite obtener largas series temporales en dominios extensos y con una distribución espacial suficiente dando lugar a un análisis adecuado. Más aún, si se complementa las bases de observaciones existentes con los datos generados para garantizar la calidad y fiabilidad de los mismos, se puede generar una base de datos homogénea y fiable.

Esta última aproximación al problema ha sido lo que se ha seguido en este trabajo para generar las bases de datos de partida.

A continuación, se pasa revista a las diferentes bases de datos consideradas.

#### 3.1. Datos atmosféricos

Se cuenta con la información histórica de las series temporales registradas por el INM en sus diferentes estaciones. Asimismo, se cuenta con la información del proyecto HIPOCAS (EPPE, 2003) que, como se verá más adelante, incluye una base de datos con las series temporales del retroanálisis de 44 años de datos de viento a 10 metros y presión superficial, tanto en la zona del Atlántico como del Mediterráneo. Para la construcción de la base de datos atmosféricos, se hizo un downscaling dinámico por medio del modelo atmosférico regional REMO (Regional Model) (Jacob y Podzun, 1997). Estas series temporales numéricas han sido extensamente validadas con datos instrumentales, especialmente boyas meteorológicas y datos de teledetección (Weisse y Feser, 2003).

Por otro lado, las bases de datos de los proyectos europeos STOWASUS-2100 y PRUDENCE, cuentan con la información de series temporales de variables atmosféricas hasta el año 2100 considerando diferentes escenarios de CO<sub>2</sub>. En concreto, la base de datos





atmosférica de PRUDENCE, permitiría realizar una predicción de las condiciones de oleaje que pueden darse en el año 2100, bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **3.2. Datos de oleaje:**

El oleaje es uno de los elementos más importantes dado que afecta a una gran cantidad de elementos de la costa. Su variabilidad puede dar lugar, como se verá más adelante, a importantes cambios que es necesario tener en cuenta a la hora de establecer políticas y estrategias.

### **3.2.1. Medidas instrumentales**

Se ha recopilado la información instrumental suministrada por el Ente Público Puertos del Estado, EPPE (Ministerio de Fomento) que incluye su red de boyas de aguas profundas y la red costera. La boya que cuenta con la serie temporal más larga incluye aproximadamente 20 años de datos. EPPE ha puesto a disposición de este proyecto toda la información disponible.

La red de aguas profundas está formada por 9 boyas Seawatch y 3 Wavescan. Los instrumentos están ubicados en puntos con profundidades entre 200 y 800 metros y miden parámetros oceanográficos y meteorológicos (ver figura 3.1).

La red costera de Puertos del Estado proporciona datos de oleaje en tiempo real en puntos de aguas poco profundas. Su objetivo es complementar las medidas de la red exterior en lugares de especial interés para las actividades portuarias o la validación de modelos de oleaje. Consta de 18 boyas escalares Waverider (red REMRO), y de 5 boyas direccionales. Dichas redes cubren la península y parte de los archipiélagos (ver figura 3.1).





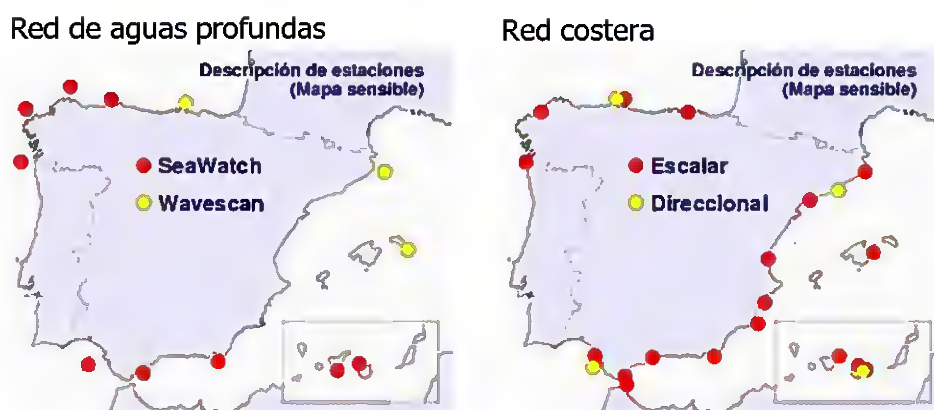


Figura 3.1. Red de boyas del Ente Público Puertos del Estado

En la tabla 3.1 se presenta un listado de las boyas de EPPE utilizadas en este estudio y el período de medida que abarcan (año inicial – año final).

Boya	Año inicio	Año final
BILBAO	1985	2002
BILBAO-VIZCAYA	1990	1999
GIJON1	1981	2002
GIJON2	1994	2002
CABO PEÑAS	1997	2001
ESTACA BARES	1997	2001
LA CORUÑA	1982	2002
VILLANO	1998	2001
SILLEIRO-D	1998	2001
SILLEIRO	1991	2002
GOLFO CÁDIZ	1997	2001
SEVILLA	1983	2002
CADIZ-D	1997	1999
CADIZ	1983	2002
CEUTA	1985	2002
ALBORAN	1997	2001
MALAGA	1985	2002
CABO GATA-D	1998	2001
CABO GATA	1981	2002
CABO PALÓS	1985	2002
ALICANTE	1985	2002
VALENCIA	1985	2002
TARRAGONA	1992	2002
PALAMOS	1988	2002
CABO BEGUR	1998	2002
CAP PERA	1989	2002
MAHÓN	1993	1999
TENERIFE	1981	2002
TENERIFE SUR	1998	2001
GRAN CANARIA	1997	2001
LAS PALMAS I	1982	2002
LAS PALMAS II	1992	2002

Tabla 3.1. Boyas de EPPE y período de medida





Por otro lado, se dispone también de un conjunto adicional de boyas en Cataluña, la red XIOM, información facilitada por la Generalitat de Catalunya (ver figura 3.2, boyas en Rosas, Tordera, Llobregat, Tortosa y Trabucador).

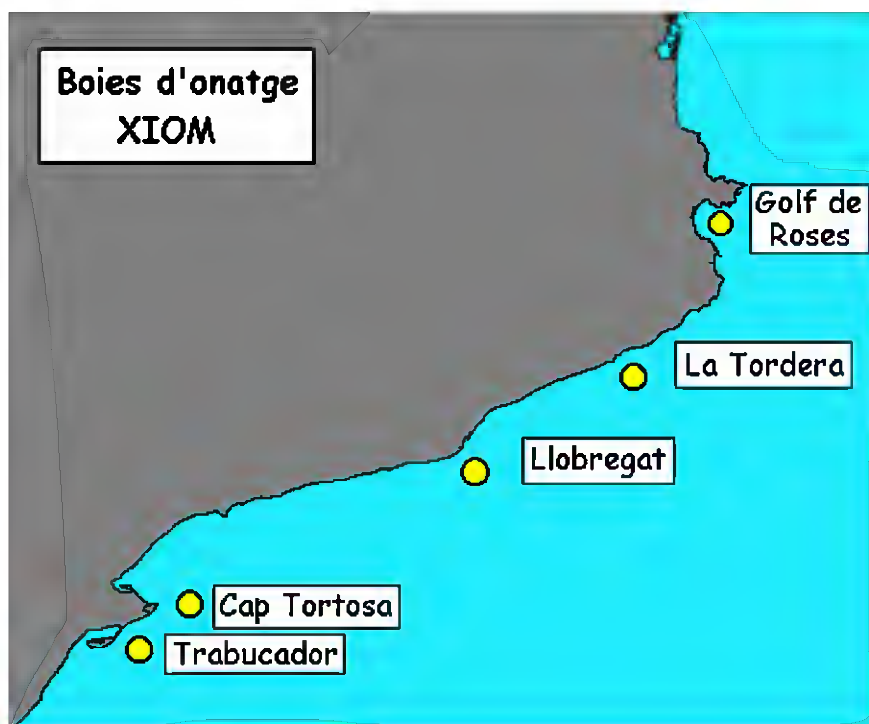


Figura 3.2. Boyas de la red XIOM (Generalitat de Catalunya).

### **3.2.2. Modelos de reanálisis**

Asimismo, se ha considerado necesario recopilar toda la información relativa a los proyectos WASA, ERA-40, HIPOCAS y STOWASUS 2100 que por su relevancia se describen con mayor detalle a continuación.

El conjunto de datos WASA procede del proyecto financiado por la UE que lleva el mismo nombre. Dicha base de datos está formada por el retroanálisis de oleaje de 40 (1955-1994) años. Los datos se obtuvieron aplicando el modelo de generación de oleaje WAM en el Atlántico Norte utilizando como entrada una serie histórica de 40 años de vientos. Los datos obtenidos son parámetros de viento, oleaje y espectro direccional en cada uno de los puntos de las mallas utilizadas.

En la actualidad se cuenta con todos los datos correspondientes a dicho proyecto.





Además, se dispone de la base de datos del reanálisis de oleaje ERA-40 del centro europeo (<http://www.ecmwf.int/research/era/>). En la figura 3.3, se muestra un detalle de la malla de 1.5° de resolución de la zona del atlántico.

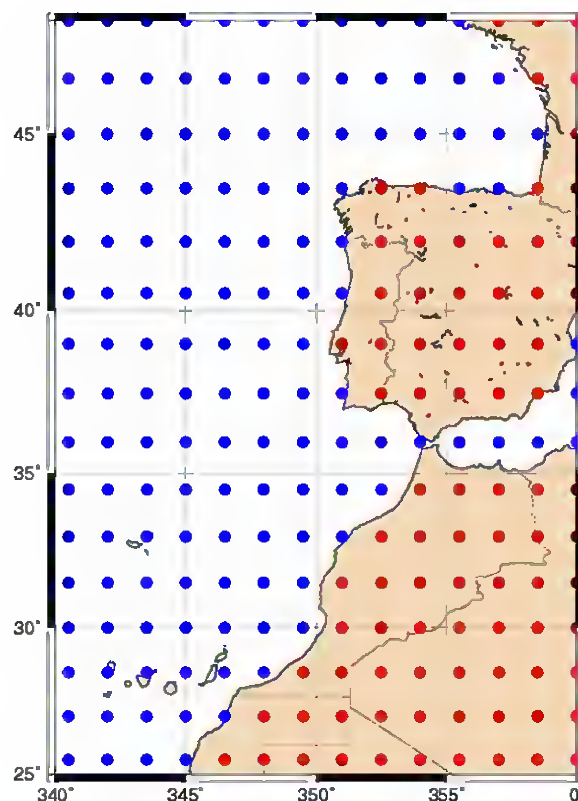


Figura 3.3. Malla del atlántico del reanálisis de oleaje ERA-40 de 1.5° de resolución

La base de datos del proyecto HIPOCAS ha sido configurada, con el fin de generar 44 años (1/1/1958-31/12/2001) de datos homogéneos de alta resolución de oleaje y nivel del mar. La resolución horizontal de estos datos es adecuada para representar, al menos, los elementos fundamentales de la línea de costa y de la batimetría con resoluciones de 5 a 10 km, dependiendo del área. Las resoluciones temporales varían entre 1 y 3 horas. Estos datos se obtienen a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos realizado por el National Centre for Environmental Prediction, Washington, USA (NCEP) y el National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA (NCAR) haciendo uso de los modelos numéricos WAM para oleaje y HAMSOM para nivel del mar.

Se cuenta con toda la base de datos del proyecto HIPOCAS correspondiente al Mediterráneo, incluidas las variables atmosféricas, así como oleaje y nivel del mar. La parte correspondiente a oleaje y nivel del mar de dicha base de datos ha sido generada por EPPE. En lo que se refiere al Atlántico, se cuenta con la información de las variable





atmosféricas que han sido obtenidas gracias al GKSS de Alemania así como del nivel del mar, información generada por EPPE (ver figuras 3.4 y 3.5).

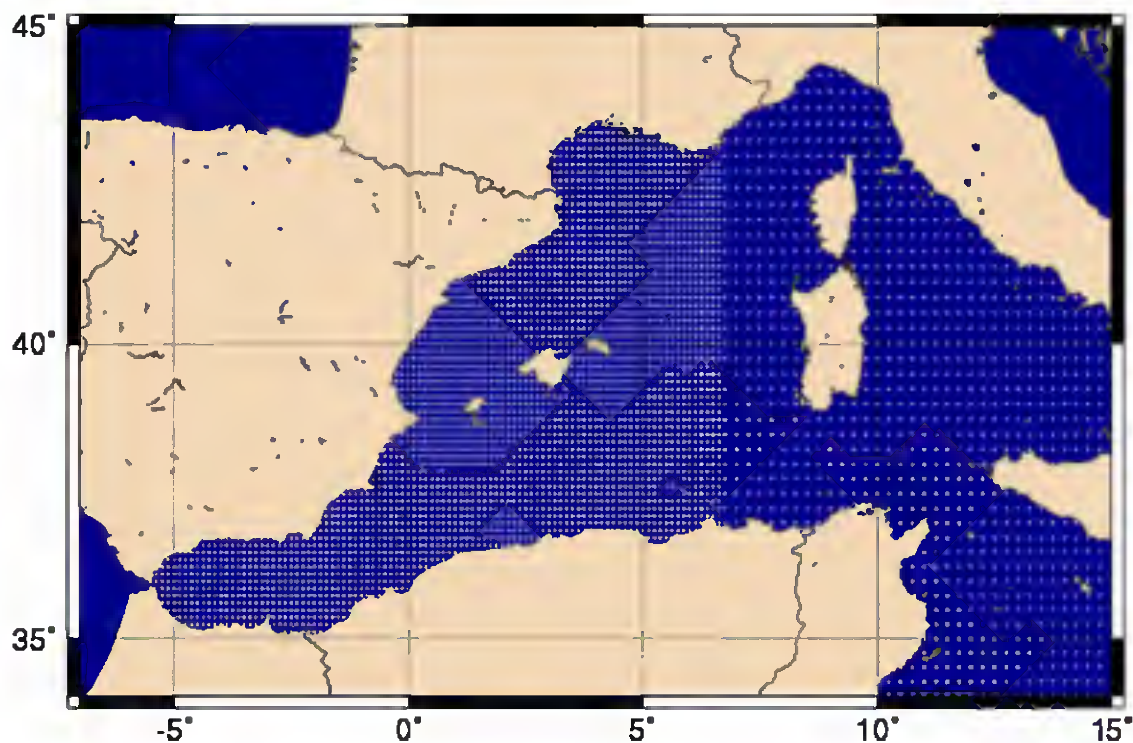


Figura 3.4. Malla correspondiente al modelo WAM de oleaje en el Mediterráneo

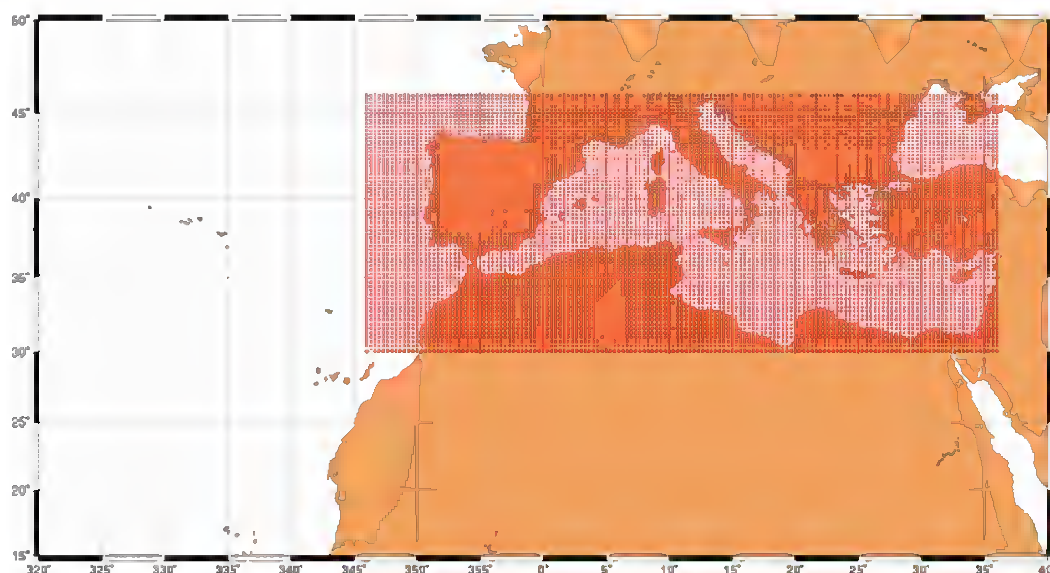


Figura 3.5. Malla correspondiente al modelo HAMSOM de niveles





La responsabilidad de la generación de los datos correspondientes al oleaje en el Atlántico ha corrido a cargo del Instituto Superior Técnico de Lisboa, coordinador del proyecto. Debido a los problemas de tiempo en cuanto a la cesión de los datos, se estableció recientemente una colaboración con Puertos del Estado para la generación, en el seno de este proyecto, de los datos correspondientes al oleaje en el Atlántico.

### **3.2.3. Modelos de predicción para escenarios de cambio climático**

El objetivo general del proyecto STOWASUS-2100, financiado por la Unión Europea ha sido estudiar eventos extremos de temporales, mareas meteorológicas y oleaje partiendo de las condiciones climáticas actuales así como de un escenario con una concentración de CO<sub>2</sub> doble de la existente en la actualidad.

El proyecto se ha basado en el modelado numérico atmosférico/oceanográfico conjunto, con el fin de analizar el clima de temporales, oleaje y mareas en las regiones del Atlántico Norte Europeo y del Mar Mediterráneo, considerando que el forzamiento estaba condicionado por un incremento en los gases de efecto invernadero.

Los datos incluyen 30 años de información con dos ejecuciones, una para el estado actual y otra con el doble de CO<sub>2</sub>. Actualmente, se cuenta con la información de las bases de datos de trayectorias de borrascas en el mar mediterráneo, proporcionada por la Universidad de Pádua a través del marco de colaboración entre la Universidad de Cantabria y Puertos del Estado.

## **3.3 Datos de nivel del mar**

### **3.3.1. Datos históricos**

Cuatro son las fuentes que se consideran fundamentales para el análisis del nivel del mar en nuestras costas, a saber: 1) la red de mareógrafos del proyecto GLOSS; 2) la red de mareógrafos de Puertos del Estado, REDMAR; 3) las series de los mareógrafos del Instituto Español de Oceanografía y finalmente, 4) las series temporales de nivel del mar obtenidas numéricamente en el proyecto HIPOCAS.

Puertos del Estado ha puesto a disposición de este proyecto los datos obtenidos por REDMAR. Sin embargo, estas series temporales no son suficientemente largas para analizar las tendencias a largo plazo necesarias para estudiar posibles efectos del cambio climático. El programa REDMAR de Puertos del Estado, en funcionamiento desde 1992, incluye medidas en Barcelona, Bilbao, Bonanza, Coruña, Gijón, Mazagón, Vigía, Málaga,







Santander, Palmas, Sevilla, Tenerife, Valencia, Vigo y Villagarcía (figura 3.6). El período de medición está comprendido entre 1992 y 2001, variando la longitud del registro en función de la localidad.



Figura 3.6. Red de mareógrafos de REDMAR (Puertos del Estado)

Las series de mayor duración se han obtenido del programa GLOSS, que en el ámbito mundial coordina 290 estaciones de medida del nivel del mar (ver figura 3.7). El principal objetivo es el seguimiento y el análisis de tendencias en la variación del nivel del mar. Como parte integrante de GLOSS, existe un comité de seguimiento de nivel del mar, PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), que desde 1933 ha recogido, publicado, analizado e interpretados los datos existentes. La base de datos de GLOSS está disponible en internet y se puede acceder a ella a través de <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>

Distribution of PSMSL Stations

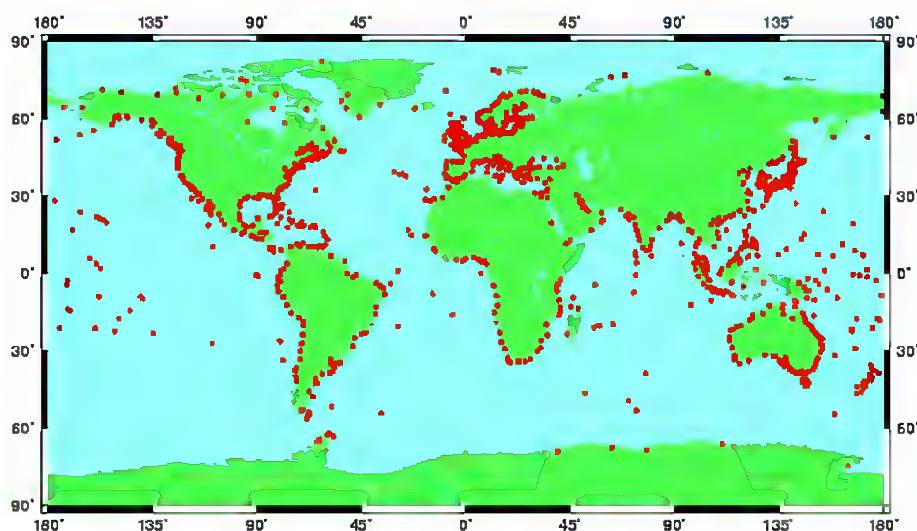


Figura 3.7. Distribución de mareógrafos integrados en la red de GLOSS





En España, las series temporales del IEO son las más adecuadas, dado que son las más largas disponibles. La información de las tendencias ha sido facilitada a través de un proyecto de investigación que está desarrollando el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados para EPPE (Marcos et al., 2004).

En cualquier caso, se han preparado las técnicas de análisis necesarias para analizar los registros de REDMAR y de diversos mareógrafos de la red GLOSS. Estas técnicas y metodologías son las que se han empleado para analizar los datos numéricos provenientes de la base de datos de HIPOCAS. Los campos de viento y de presión superficial obtenidas del modelo REMO, fueron empleados como forzamiento del modelo HAMSOM con la finalidad de generar una base de datos de 44 años de retroanálisis de residuo de nivel del mar. Esta aplicación del modelo HAMSOM cubre tanto la cuenca mediterránea como parte del Atlántico.

### **3.3.2. Predicciones de ascenso del nivel del mar**

En cuanto a las predicciones de variación del nivel medio del mar, se van a utilizar los resultados de los modelos globales para los distintos escenarios contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe (ver figura 3.8). En dicho informe se definen a lo largo del siglo XXI y para cada escenario, las variaciones del nivel medio del mar así como el rango de variación para cada uno de ellos. A la vista de los resultados obtenidos, se puede establecer la horquilla de variación de entre 20 y 80 cm en los próximos 100 años.

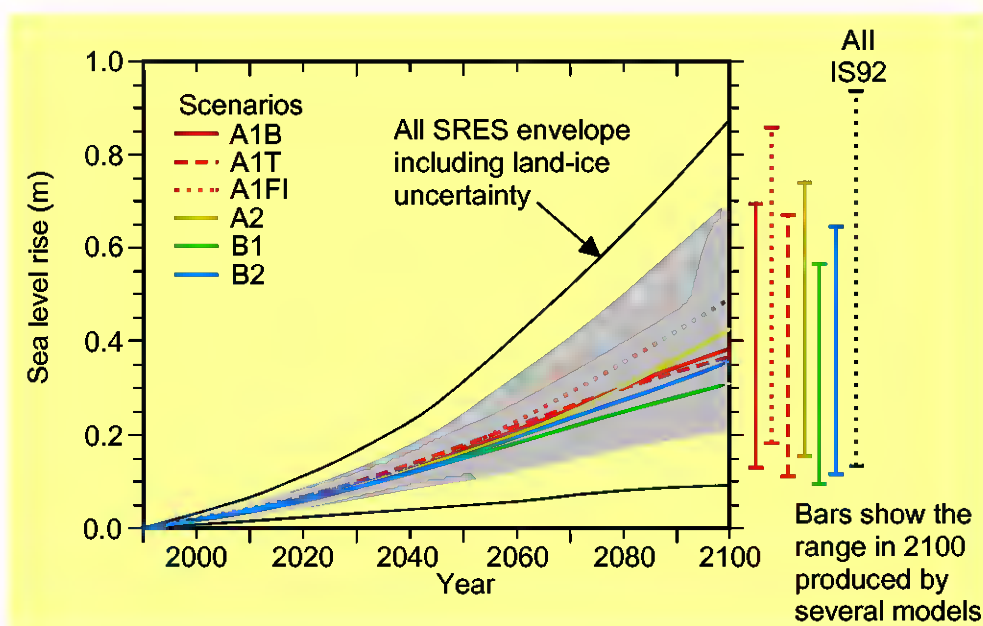


Figura 3.8. Escenarios de subida del nivel medio del mar (IPCC, 2001)





### **3.4. Datos de subsidencia**

La información relativa a subsidencia se encuentra muy dispersa entre diferentes investigadores e instituciones que vienen trabajando en este tema desde hace varios años. No existe una base de datos homogénea.

Por tanto, se ha recopilado toda la información disponible, esencialmente la bibliografía generada por los investigadores españoles que trabajan en este proceso (p.e., Somoza et al., 1998; Zazo et al., 2002; Zazo et al., 2003). La revisión de la misma ha puesto de manifiesto que, aunque el fenómeno de la subsidencia se produce de forma más notable en algunos puntos del litoral español como, por ejemplo, el Delta del Ebro (1- 3 mm año), la magnitud de dicha subsidencia y más aún, la escala temporal de dicho fenómeno, que supera ampliamente la escala temporal considerada en este trabajo, hacen dicho fenómeno despreciable a efectos de este estudio.

### **3.5. Datos de caudal fluvial**

#### **3.5.1. Datos históricos**

Los datos de caudal fluvial utilizados en este estudio provienen del Libro Blanco del Agua en España (MIMAM, 1998) y del Plan Hidrológico Nacional (2000) y han sido generados mediante el modelo SIMPA. El propio Plan Hidrológico Nacional incluye una serie de simulaciones para diferentes escenarios de cambio climático que también han sido consideradas. El modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación), es un modelo de tipo conceptual y distribuido, que simula caudales medios mensuales en régimen natural, en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca (Estrela et al., 1999).

#### **3.5.2. Modelos de predicción para escenarios de cambio climático**

Por otro lado, y más allá del ámbito nacional, se ha contado con las bases de datos del proyecto WRINCLE (Water Resources: the Impact of Climate change in Europe, ENV4-CT97-0452), financiado por la Unión Europea y en el cual participan centros de investigación punteros en el tema de la meteorología y la hidrología. Dicho proyecto ha tenido como objetivo evaluar el impacto que el cambio climático y su variabilidad ha tenido sobre los recursos hídricos en Europa. Para ello, han evaluado los caudales, la disponibilidad de los recursos hídricos y la calidad del suministro de energía hidroeléctrica a partir de modelos atmosféricos de última generación, con los que han generado diferentes escenarios de cambio climático (<http://wrsrl.ncl.ac.uk/wrinclle>).







El resultado se ha presentado como una serie de Atlas digitales que incluyen, entre otros: funciones de distribución de caudales medios y factores de torrencialidad diaria durante el periodo 1961-1990 y para el escenario de cambio climático con el doble de CO<sub>2</sub>.

En la figura 3.10 se muestra, para toda Europa, diversos resultados de variación estacional de la escorrentía media y del coeficiente de variación (torrencialidad).

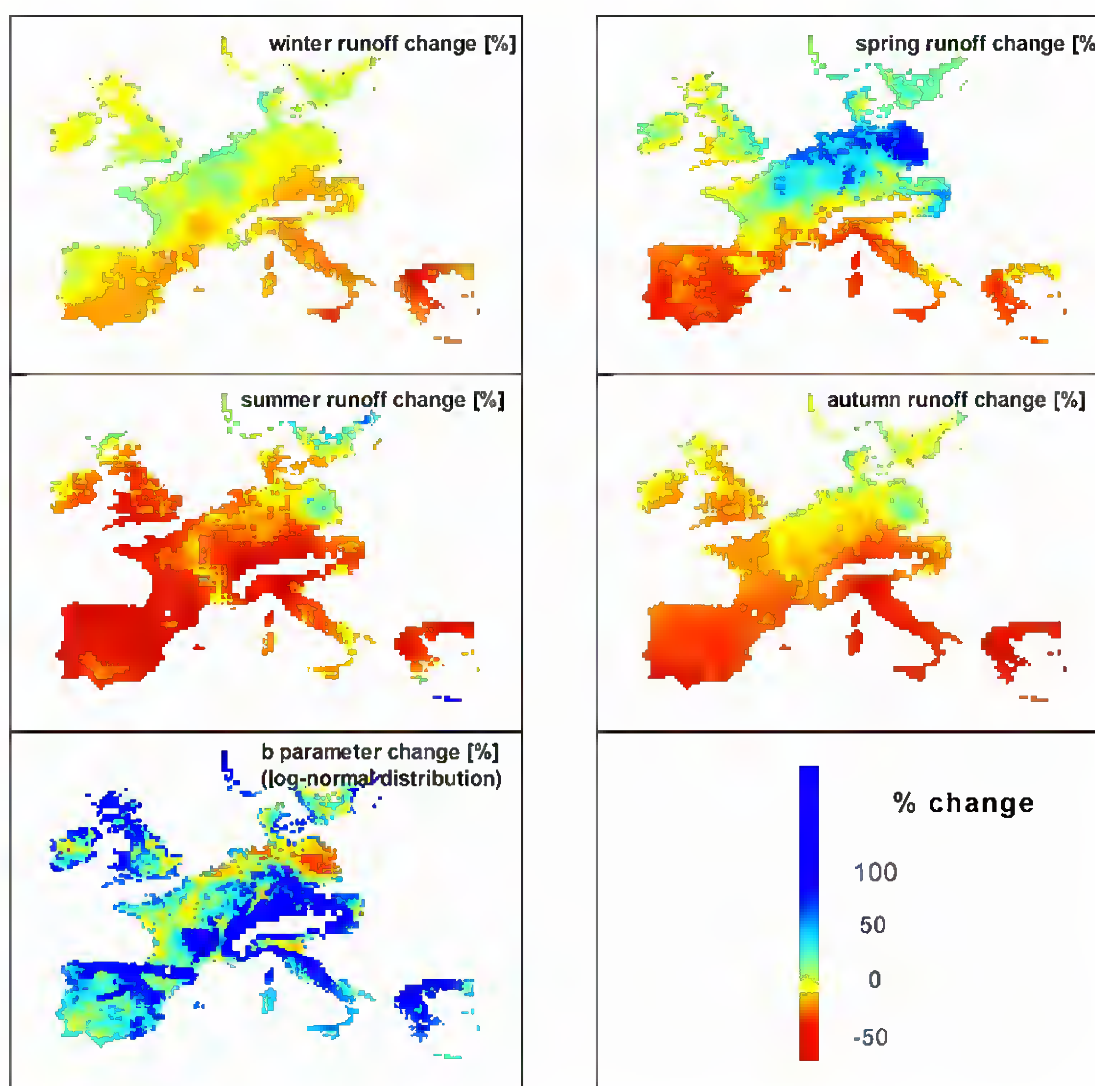


Figura 3.10.-Cambio estacional (%), para la escorrentía estacional y para el parámetro de *b* de la distribución log-normal.





### 3.6. Datos de caudal sólido

El trabajo realizado para la recopilación de datos de caudal sólido, ha puesto claramente de manifiesto la ausencia generalizada de datos en todas las cuencas. A esto hay que añadir que prácticamente todas las cuencas importantes se encuentran reguladas, lo cual redundaría en la inexistencia de aportaciones de caudal sólido en nuestras costas. Por otro lado, la puesta en marcha de los planes hidrológicos de cuenca, va a producir una mayor regulación de nuestra red fluvial limitando aún más el aporte de sólidos a la costa. Para soslayar el problema de ausencia de datos, se ha hecho un estudio preliminar sobre las posibles cuencas que todavía se encuentran poco o nada reguladas. Para alguna de estas pequeñas cuencas se ha considerado oportuno estudiar la posibilidad de completar las bases de datos existentes mediante la generación de datos numéricos de caudal sólido. Para ello, se han utilizado modelos basados en la ecuación MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). Este tipo de modelos de erosión han sido suficientemente probados en todo el mundo y generan información bastante fiable.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE  
LAS BASES DE DATOS**

---



## 4. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Aunque en la sección anterior, ya se ha adelantado alguna información relativa a las bases de datos, la evaluación realizada nos ha llevado a las siguientes conclusiones:

### 4.1. Datos atmosféricos

- 1) Se considera que la base de datos atmosféricos del HIPOCAS es adecuada para el trabajo de retroanálisis que se desea desarrollar en este proyecto, dado que es una base de datos de alta resolución y homogénea tanto espacial como temporalmente. Se considera que los forzamientos de las dinámicas marinas que se desea evaluar (oleaje, nivel) son adecuados y suficientemente fiables como para garantizar unos buenos resultados.
- 2) Los proyectos STOWASUS-2100 y PRUDENCE incluyen la predicción de las variables atmosféricas relevantes para los próximos 100 años, con base en diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub>. Por ello, estas bases de datos se consideran muy relevantes para este estudio.

### 4.2. Datos de oleaje

- 1) Las series instrumentales, especialmente las correspondientes al sistema de boyas de Puertos del Estado son limitadas en cuanto a su distribución espacial y muy especialmente en cuanto a la longitud temporal de sus registros, por lo que no pueden ser utilizados de forma directa para realizar un retroanálisis de los posibles efectos del cambio climático.
- 2) Aunque los datos del WASA son el primer intento por tener una base de datos con un retroanálisis del oleaje sobre una malla relativamente densa, estos datos han sido ampliamente superados por iniciativas posteriores tales como las de HIPOCAS.
- 3) A día de hoy, HIPOCAS incluye la base de datos con el retroanálisis más largo (44 años) y con mayor resolución temporal y espacial, incluyendo información de oleaje y nivel del mar (barotrópico). Por tanto, se tomará como base fundamental para el análisis del oleaje en este estudio.
- 4) La información proporcionada por la base de datos HIPOCAS es enormemente amplia. En la figura 4.1 se muestran 3 campos de altura de ola significativa horaria que cubren el área del Mediterráneo. Nótese la elevada resolución espacial y temporal, ya





que se disponen de cada parámetro más de 380.000 datos (24 horas x 365 días x 44 años). Sin embargo, desde un punto de vista cuantitativo, se ha comprobado que dicha base de datos no es del todo correcta, ya que los valores de las variables se desvían ligeramente de lo registrado en las boyas de medida de Puertos del Estado. Eso obliga a la realización de un proceso de calibración de los datos no inicialmente considerado en las tareas del proyecto.

- 5) Desde un punto de vista predictivo, las bases de datos de STOWASUS 2100 y PRUDENCE, se consideran las más adecuadas para análisis de diferentes escenarios futuros.

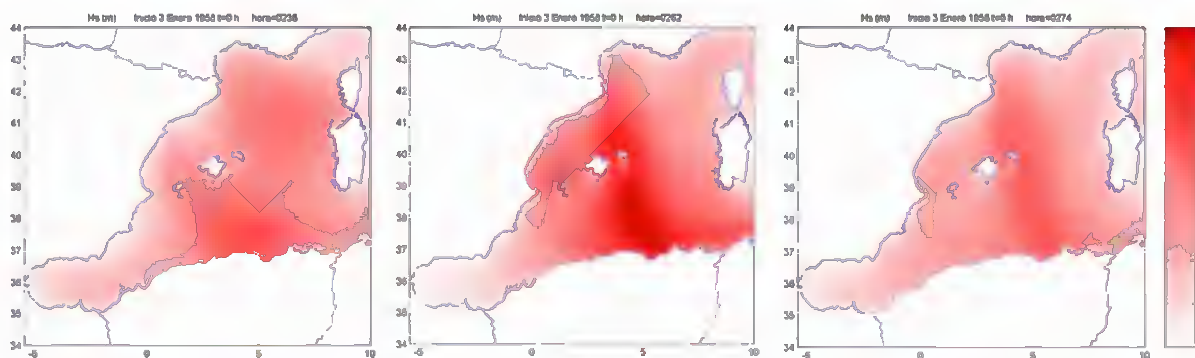


Figura 4.1. Ejemplo de campos horarios de altura de ola significativa de HIPOCAS

### 4.3. Datos de nivel del mar

- 1) Las series temporales de nivel del mar medidas por el IEO son las más adecuadas para el análisis de tendencias dado que son las más largas. Dichas series, conjuntamente con las medidas de Puertos del Estado, han sido analizadas en otro proyecto. Este análisis, junto con los datos de la red GLOSS, son la base utilizada en el presente trabajo.
- 2) La información de las series obtenidas de los mareógrafos del IEO corresponde únicamente a un número limitado de puntos. Por ello, se considera importante complementar dicho estudio de nivel del mar mediante el retroanálisis de las bases de datos numéricas obtenidas en el marco de HIPOCAS a partir del modelo HAMSOM. Estos datos, tanto en el Mediterráneo como en el Atlántico son los que se han utilizado inicialmente en este estudio.





#### **4.4. Datos de subsidencia**

Como se ha indicado anteriormente, la subsidencia se va a considerar inicialmente despreciable.

#### **4.5. Datos de caudal fluvial**

Se considera que los datos obtenidos del proyecto WRINCLE son adecuados para su utilización en el presente estudio.

#### **4.6. Datos de caudal sólido**

Se carece totalmente de información a este respecto, por lo que se han generado datos numéricamente mediante un modelo basado en la ecuación MUSLE.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 5. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE  
DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

---



## 5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE DE ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA

En este apartado se describe los trabajos realizados en cuanto al análisis de la información existente de índices de cambio climático en la costa.

En esta etapa del proyecto, el trabajo se ha centrado en realizar una búsqueda bibliográfica sobre indicadores de los efectos del cambio climático en la costa. Para ello se ha investigado el trabajo realizado por diversos organismos o instituciones que son un punto de referencia en este tema, bien porque están relacionados con proyectos internacionales relacionados con el cambio climático (IPCC, UNESCO,...), o bien por ser centros de reconocido prestigio (EPA, NOAA,...). En los siguientes subapartados se recoge la información más relevante de entre toda la analizada.

### 5.1 Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

Se ha estudiado los informes realizados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). En estos informes, en concreto en el informe titulado: "*Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas*", se analizan los cambios producidos en la atmósfera, clima y sistema biológico terrestre durante el siglo XX. Para detectar los cambios producidos se utiliza indicadores, entre los cuales hay indicadores de concentración, meteorológicos, físicos, biológicos, económicos, etc. De todos ellos el único indicador relacionado con la costa, con interés para España, es el denominado *Media mundial del nivel del mar* (ver figura 5.1).







Cuadro RRP-1 Cambios en la atmósfera, clima y sistema biológico terrestre durante el siglo XX. <sup>a</sup>	
Indicadores	Cambios observados
<i>Indicadores físicos y biológicos</i>	
Media mundial del nivel del mar	Aumento a una velocidad media anual de 1 a 2 mm durante el siglo XX.
Duración de las capas de hielo en ríos y lagos	Disminución de unas 2 semanas en el siglo XX, en las latitudes medias y altas del Hemisferio Norte ( <i>muy probable</i> ).
Extensión y espesor del hielo marino en el Ártico	Disminución en un 40 por ciento en los últimos decenios desde finales del verano a principios del otoño (probable) y disminución de su extensión en un 10-15 por ciento desde el decenio de 1950, en primavera y verano.
Glaciares no polares	Retiro generalizado durante el siglo XX.
Capa de nieve	Disminución de su extensión en un 10 por ciento desde que se registran observaciones por satélite en los años 1960 ( <i>muy probable</i> ).
Permafrost	Fusión, calentamiento y degradación en las zonas polares, subpolares y regiones montañosas.
Fenómenos asociados con El Niño	Mayor frecuencia, persistencia e intensidad durante los últimos 20-30 años, en relación con los últimos 100 años.
Época de crecimiento	Aumento de 1 a 4 días por decenio durante los últimos 40 años en el Hemisferio Norte, especialmente en las latitudes altas.
Área de distribución de plantas y animales	Desplazamiento de plantas, insectos, pájaros y peces hacia los polos o hacia altitudes más altas.
Cría, floración y migración	Adelanto de la floración, la llegada de las primeras aves, la época de cría y la aparición de los insectos en el Hemisferio Norte.
Decoloración de arrecifes de coral	Aumento de la frecuencia, especialmente durante los fenómenos asociados con El Niño.
<i>Indicadores Económicos</i>	
Pérdidas económicas relacionadas con fenómenos meteorológicos	Aumento de las pérdidas mundiales, ajustadas a la inflación, en un orden de magnitud durante los últimos 40 años (véase la Figura 2-7 en P2). Una parte de la tendencia ascendente está vinculada a factores socioeconómicos, y otra parte, a factores climáticos.
<sup>a</sup> Este cuadro sólo proporciona ejemplos de cambios fundamentales observados, y no es una lista exhaustiva. Incluye cambios atribuidos a los cambios climáticos antropogénicos y cambios que pueden haber sido causados por variaciones naturales o por cambios antropogénicos. Se indican los niveles de confianza cuando el Grupo de Trabajo correspondiente los evalúa de forma explícita. Un cuadro idéntico en el Informe de síntesis del TIE contiene referencias cruzadas a los informes del GTI y del GTII.	

Figura 5.1. Cuadro RRP-1. Cambio climático 2001. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

## 5.2 UNESCO

Este organismo participa en un proyecto internacional: Global Ocean Observing System (GOOS) y su módulo GLOSS (Global Sea Level Observing system), dedicado a desarrollar una red internacional de medidas de nivel del mar para su aplicación en estudios de clima, oceanográficos y de investigación sobre variación del nivel del mar en la costa. En el apartado 3.3.1 se comenta las características de esta red.





### 5.3 UNEP (United Nations Environment Program)

En el libro publicado por este organismo: *Handbook of methods for climate change impacts assessment and adaptation strategies, 1998*, en el capítulo dedicado a las zonas costeras, se menciona que el primer punto importante en un estudio de valoración es la adquisición de datos y/o parámetros que caractericen el área de estudio. Como características fundamentales de las zonas costeras el estudio considera las siguientes:

- Geomorfología de la costa y topografía.
- Registros históricos de cambio relativo del nivel del mar.
- Tendencias en aporte de sedimentos y en patrones de erosión/acumulación.
- Características hidrológicas y meteorológicas.
- Características meteorológicas-oceanográficas.
- Características del ecosistema.

En este libro no se habla de indicadores como tal, pero de la anterior enumeración se puede deducir los parámetros/indicadores que considera.

### 5.4 DEFRA: Department for Environment Food and Rural Affairs (UK)

Este organismo de Reino Unido publicó en 1999 un documento con 34 indicadores de cambio climático ([www.nbu.ac.uk/iccuk/](http://www.nbu.ac.uk/iccuk/)). En 2003, se publicó un documento titulado: *Review of Uk climate change indicators*, en el cual se hacía una revisión del informe de 1999. De los 34 indicadores considerados aquellos relacionados con cambio climático en la costa son: Índice NAO (oscilación del Atlántico Norte), elevación del nivel medio y riesgo de inundación por marea en Londres.

### 5.5 OECD: Organisation for Economic Development and Co-operation

Los documentos publicados por esta organización relacionados con indicadores son:

- OECD environmental indicators. Development, measurement and use (2003).
- OECD key environmental indicators (2004).





Estos documentos consideran indicadores ambientales en general e, incluidos en éstos, se encuentran los relacionados con cambio climático (ver figura 5.2).

**Box 5 Structure of the OECD indicators Core Set by environmental issue**

Major issues	PRESSURE Indicators of environmental pressures	STATE Indicators of environmental conditions	RESPONSE Indicators of societal responses
1. <b>Climate change</b>			
2. Ozone layer depletion			
3. Eutrophication			
4. Acidification			
5. Toxic contamination			
6. Urban environmental quality			
7. Biodiversity			
8. Cultural landscapes			
9. Waste			
10. Water resources			
11. Forest resources			
12. Fish resources			
13. Soil degradation (desertification, erosion)			
14. Material resources			
15. Socio-economic, sectoral and general indicators			

Figura 5.2. Indicadores ambientales. OECD (2004)

Respecto a los indicadores de cambio climático, la OECD no considera ninguno relacionado con la costa.

### 5.6 EPA: Environmental Protection Agency (USA)

En la página web de la EPA, se indica que este organismo tiene el objetivo de investigar sobre el desarrollo de indicadores de ecosistemas para que actúen como centinelas de cambio climático. Los estudios se centraran en indicadores terrestres, acuáticos y costeros, con especial atención en relacionar indicadores del estado de los ecosistemas con la salud humana.

No se ha encontrado información más precisa sobre indicadores que la EPA utilice.





## 5.7 ANZECC: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council

De este organismo se ha encontrado tres documentos relacionados con indicadores:

- Environmental Indicators. For national state of the environment reporting. Estuaries and the sea (1998).
- Core environmental indicators for reporting on the state of the environment (2000).
- Coast and oceans (2001).

Entre todos los indicadores considerados para analizar el estado del medioambiente, en el apartado de estuarios y mar, existe un grupo denominado Procesos globales en el que se considera dos indicadores: Nivel del mar y temperatura de la superficie del mar.

## 5.8 CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment

El informe publicado por este organismo se titula: *Climate, Nature, People: Indicators of Canada's changing climate (2003)*. En este documento se clasifican los indicadores de cambio climático en tres grupos: clima, naturaleza y gente. Dentro de la categoría naturaleza, se considera entre otros la elevación del nivel medio del mar. En la figura 5.3 se puede ver los indicadores considerados por Canadá.



Figura 5.3. Climate, Nature, People: Indicators of Canada's changing climate (2003)





## 5.9 Conclusiones

Una vez analizada la bibliografía disponible sobre indicadores de cambio climático, se llega a la conclusión de que existe escasa información sobre indicadores específicos de cambio climático en la costa. Salta a la vista que, el indicador por excelencia analizado por todos los trabajos revisados es la elevación del nivel del mar, sin embargo, no se ha encontrado ningún estudio que tenga en cuenta otros parámetros relacionados con procesos fundamentales en la costa, como por ejemplo el oleaje y el viento.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

---



**FASE I A. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

**CAPÍTULO 6. REFERENCIAS**

---



## 6. REFERENCIAS EXTRA

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.

ESTRELA, T.; CABEZAS, F.; ESTRADA, F. (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. Ingeniería del Agua, Vol. 6(2), p. 125-138.

IPCC (2001). Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers. 145 pags.

JACOB, D. & PODZUN, R. (1997). Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorol. Atmos. Phys., 63, 119-129.

MARCOS, M.; GOMIS, D.; MONSERRAT, S.; ÁLVAREZ, E.; PÉREZ, B.; GARCÍA-LAFUENTE, J. (2004). Consistency of long sea-level time series in the Northern coast of Spain.

MIMAM (1998). Libro blanco del agua. Ministerio de Medio Ambiente.

MIMAM (2000). Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente.

SOMOZA, L.; BARNOLAS, A.; ARASA, A.; MAESTRO, A.; REES, J. G.; HERNANDEZ-MOLINA, F. J. (1998). Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holocene high-frequency eustatic fluctuations, delta-lobe switching and subsidence processes. Sedimentary Geology, Volume 117, Issues 1-2, Pags 11-32.

WEISSE, R. & FESER, F. (2003). Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models. Coastal Eng. 48(4) pp 211-225

ZAZO, C.; GOY, J. L.; DABRIO, C. J.; BARDAJÍ, T.; HILLAIRE-MARCEL, C.; GHALEB, B.; GONZÁLEZ-DELGADO, J.-A.; SOLER, V. (2003). Pleistocene raised marine terraces of the Spanish Mediterranean and Atlantic coasts: records of coastal uplift, sea-level highstands and climate changes. Marine Geology, Volume 194, 1-2, Pags 103-133.

ZAZO, C.; GOY, J. L.; HILLAIRE-MARCEL, C.; GILLOT, P.; SOLER, V.; GONZÁLEZ-DELGADO, J.-A.; DABRIO, C.J.; GHALEB, B. (2002). Raised marine sequences of Lanzarote and Fuerteventura revisited: reappraisal of relative sea-level





changes and vertical movements in the eastern Canary Islands during the Quaternary. Quaternary Science Reviews, Volume 21, Issues 18-19, 2019-2046.

Weisse, R., Feser, F. (2003). Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models, Coastal Eng.





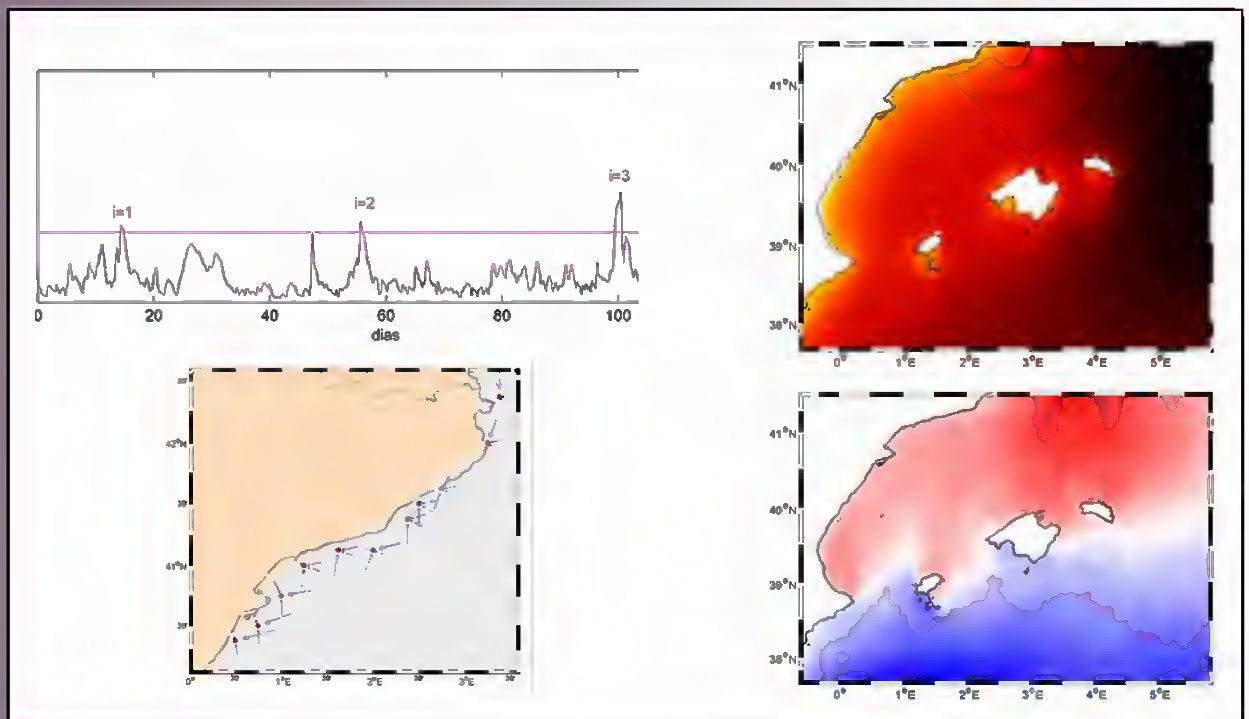


MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE

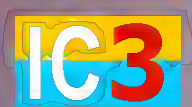


# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



## FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Fase I-b) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guancho, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## **EXPOSICIÓN DE MOTIVOS**

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## **OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO**

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

### **FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

### **FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

### **FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsibles cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Fase I-b:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Fase I-b. Análisis de datos de clima marítimo y nivel del mar.**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**ÍNDICE**

---





## Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1.1
Capítulo 2. CALIBRACIÓN PUNTUAL .....	2.1
2.1. Introducción.....	2.1
2.2. Metodología de calibración.....	2.3
2.3. Validación de la calibración realizada.....	2.16
Capítulo 3. MODELO DE CALIBRACIÓN ESPACIAL .....	3.1
3.1. Introducción.....	3.1
3.2. Esquema de la metodología.....	3.2
Capítulo 4. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE OLEAJE, VIENTO Y MAREA METEOROLÓGICA .....	4.1
4.1    Análisis de tendencias de valores medios .....	4.1
4.1.1 Variables escalares .....	4.1
4.1.2 Variables direccionales .....	4.5
4.2    Análisis de tendencias de duraciones de excedencia.....	4.7
4.3    Análisis de tendencias de valores extremos. ....	4.10
4.3.1 Introducción .....	4.10
4.3.2 Modelos de variación de la frecuencia de eventos extremales.....	4.12
4.3.3 Modelos de variación de la intensidad de eventos extremales.....	4.14
4.3.4 Cálculo de las bandas de confianza del estimador de la tendencia .....	4.19
Capítulo 5. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y DE LA MAREA ASTRONÓMICA .....	5.1
5.1. Introducción.....	5.1
5.2    Análisis del nivel medio .....	5.2
5.3    Análisis de tendencias de la marea astronómica .....	5.10
Capítulo 6. REFERENCIAS .....	6.1



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---



## 1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta las metodologías que se han desarrollado y las herramientas que se han utilizado, para el análisis de las tendencias de cambio de las variables geofísicas en la costa española a lo largo del siglo XX.

La estructura del documento es la siguiente: En las secciones 2 y 3 se detalla la metodología de calibración espacio-temporal de variables geofísicas, de modelos de reanálisis. La sección 2 está dedicada a la calibración puntual de una serie temporal de modelo de reanálisis, a partir de la información de la boya más cercana. Esta tarea se ha realizado con el fin de homogeneizar la información instrumental con el resultado del modelo de reanálisis. La sección 3 aborda la calibración espacial de modelos de reanálisis y su aplicación a las bases de datos de oleaje y de marea meteorológica del proyecto HIPOCAS en el litoral español. Posteriormente, en la sección 4 se explican las técnicas que se han desarrollado para el análisis de tendencias de las variables que definen el clima marítimo, tanto para régimen medio como para régimen extremal. Finalmente, en la sección 5 se comentan las técnicas que se han utilizado para analizar tendencias de variación de nivel medio y de marea astronómica.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 2. CALIBRACIÓN PUNTUAL**

---



## 2. CALIBRACIÓN PUNTUAL

### 2.1. Introducción

Se ha realizado una calibración puntual de la base de datos del proyecto HIPOCAS, obtenidas del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos, a partir del modelo numérico WAM (EPPE, 2003), y la serie de datos instrumental que Puertos del Estado y la Generalitat de Catalunya, poseen en el litoral español, que proporciona datos de oleaje en tiempo real en puntos de aguas poco profundas.

Los datos suministrados por el proyecto HIPOCAS, tienen una resolución espacial de  $0.125^\circ$ , una resolución temporal de 1 hora en el Mediterráneo y una resolución espacial de  $0.25^\circ$  y temporal de 3 horas para el Atlántico y Canarias, además de una serie continua de datos 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,  $\theta$ . 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:

$$\begin{aligned} S_1(f, \theta) &= E_{1 \text{ JONSWAP}} ((H_{s1}, T_{m1}) \cdot D(\theta_1)) \\ S_2(f, \theta) &= E_{2 \text{ JONSWAP}} ((H_{s2}, T_{m2}) \cdot D(\theta_2)) \\ S_3(f, \theta) &= E_{3 \text{ JONSWAP}} ((H_{s3}, T_{m3}) \cdot D(\theta_3)) \end{aligned}$$

Siendo el espectro resultante, la suma de los diferentes espectros que caracterizan el estado de mar, en cada punto de la malla de HIPOCAS (figura 2.1).

$$E_H(f, \theta) = S_1(f, \theta) + S_2(f, \theta) + S_3(f, \theta)$$



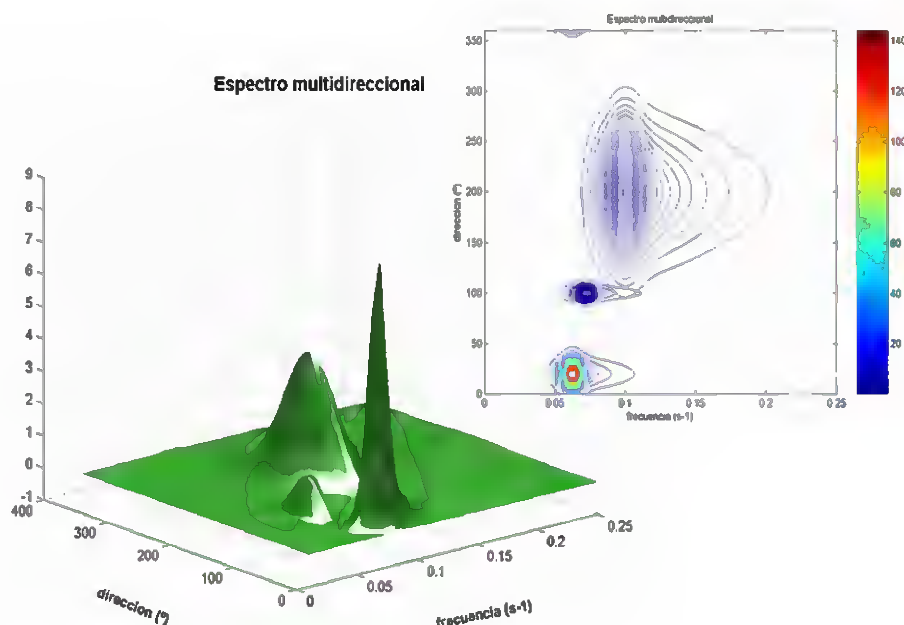


Figura 2.1. Espectro multidireccional representativo de un estado de mar en un punto cualquiera.

Los datos instrumentales proporcionados por las boyas de Puertos del Estado y la Generalitat de Catalunya, poseen una alta calidad en sus registros que van desde los 20 a los 6 años, siendo éstos de diversa resolución tanto temporal como espacial. Las boyas se encuentran en profundidades reducidas o intermedias, por lo que el oleaje que les llega estará afectado de todas las transformaciones propias de la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas, asomeramiento, refracción y difracción, no siendo así con los datos suministrados por el proyecto HIPOCAS, ya que al haber sido obtenidos a partir del modelo WAM, no se han tenido en cuenta los procesos de propagación del oleaje en aguas poco profundas.

Para realizar la calibración de la serie de HIPOCAS en un punto cercano a una boya, se ha desarrollado una metodología que en resumen se puede decir que: se corrige el oleaje del punto HIPOCAS (altura de ola significativa,  $H_S$ , y periodo medio,  $T_m$ ), tal que al realizar la propagación de la serie completa de estados de mar, los regímenes medios (distribuciones estadísticas), tanto de  $H_S$ , como de  $T_m$ , coincidan.





## 2.2. Metodología de calibración

La metodología empleada para la calibración puede ser sintetizada de la forma que sigue:

1.-Se han realizado más de 250 simulaciones de oleaje monocromático, en cada una de las 23 boyas del Litoral Peninsular e Islas Canarias, seleccionadas para la calibración (figura 2.2).



Figura 2.2. Boyas seleccionadas para la calibración.

Para ello, se han obtenido en primer lugar las batimetrías detalladas de las zonas próximas donde se encuentran situadas las boyas, tal y como muestra la figura 2.3, para la boya situada en A Coruña. Todas las batimetrías han sido extraídas del BACO, base de datos que se encuentra dentro del Sistema de Modelado Costero, SMC, desarrollado por el GIOC, (2002), para el Ministerio de Medio Ambiente.





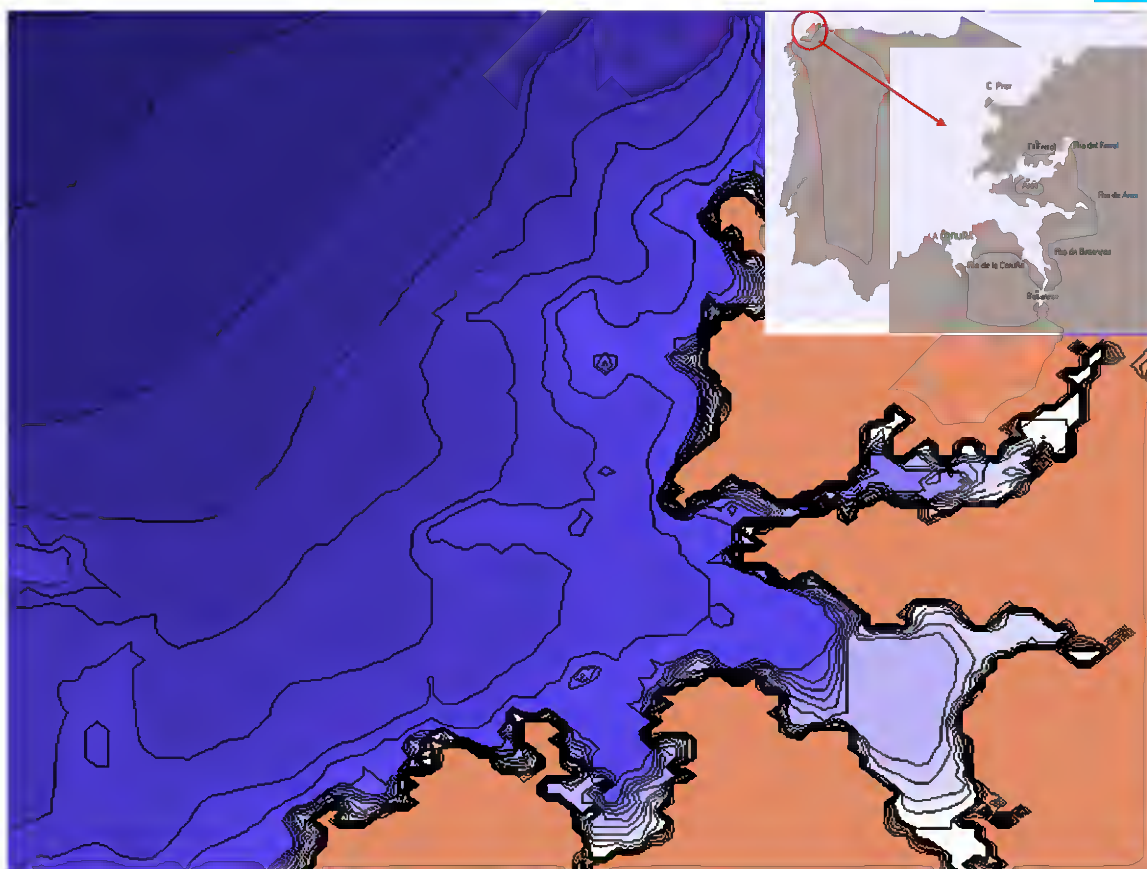


Figura 2.3. Batimetría detallada de la zona correspondiente a la boya de A Coruña.

Se utilizó el módulo ODIN, que se encuentra dentro del Sistema de Modelado Costero, SMC, desarrollado por el GIOC (2002), para caracterizar todo el abanico de oleajes posibles, figura 2.4.

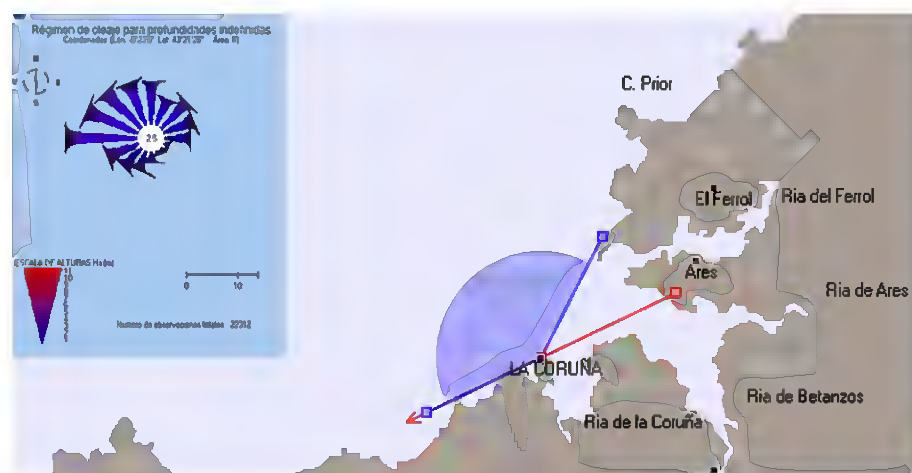


Figura 2.4. Rosa de oleaje y abanico de ángulos de incidencia de la zona correspondiente a la boya de A Coruña.





En el caso de A Coruña, se han definido tres mallas de propagación (figuras 2.5, 2.6 y 2.7), para abarcar las direcciones de oleaje posibles.



Figura 2.5. Mallas de propagación de la zona correspondiente a la boya de A Coruña.



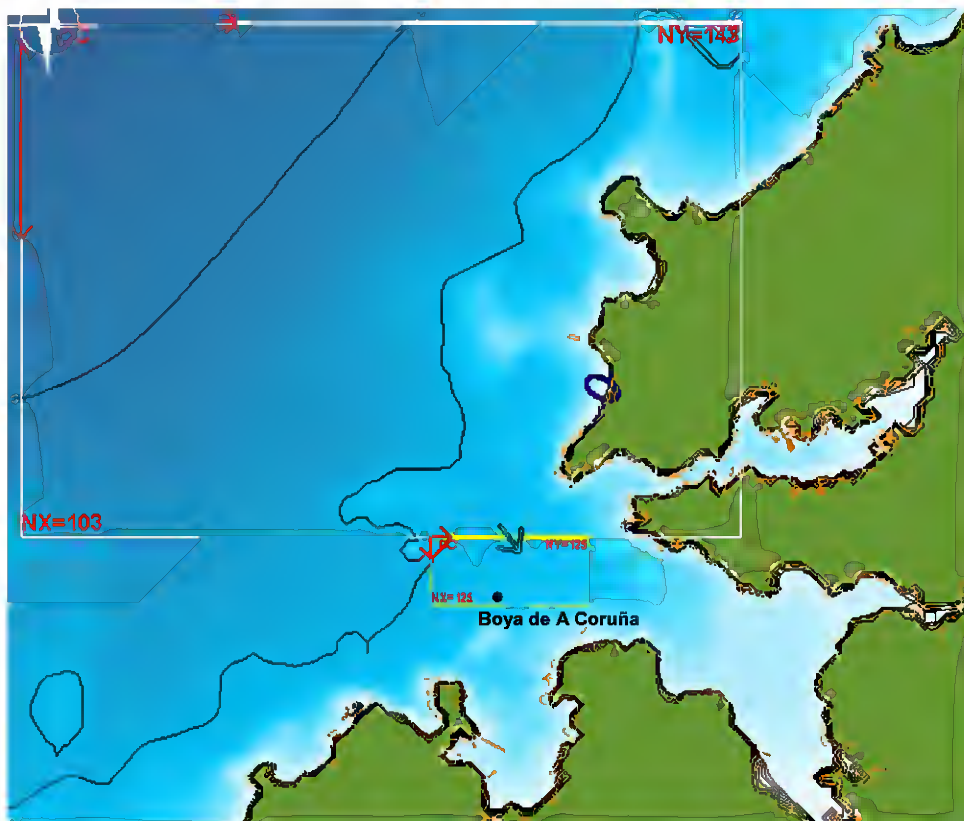


Figura 2.6. Mallas de propagación de la zona correspondiente a la boya de A Coruña

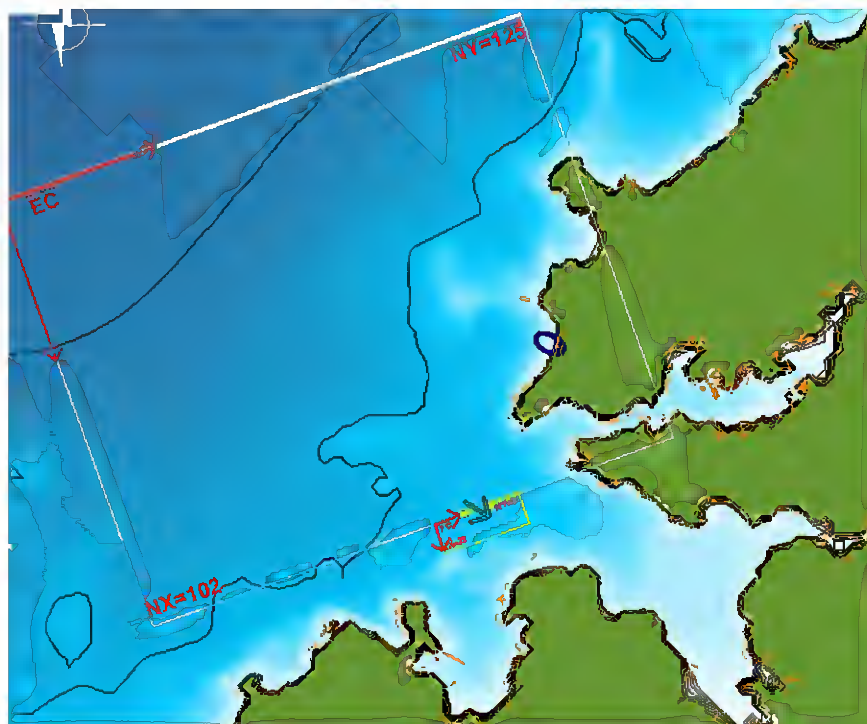


Figura 2.7. Mallas de propagación de la zona correspondiente a la boya de A Coruña





Para realizar las propagaciones se ha utilizado el modelo de propagación de oleaje monocromático OLUCA-RD, con el que se han 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, dirección y periodo únicos. Además, en las zonas donde existe marea, cada componente también se caracteriza con el nivel de marea.

A continuación, se muestran varias propagaciones realizadas para la boya de A Coruña con diferentes periodos, direcciones y niveles de marea (figuras 2.8, 2.9 y 2.10). El círculo rojo indica la posición de la boya. Nótese como el coeficiente de propagación depende de la dirección,  $\theta$ , del periodo,  $T$  y del nivel del mar,  $NM$ .

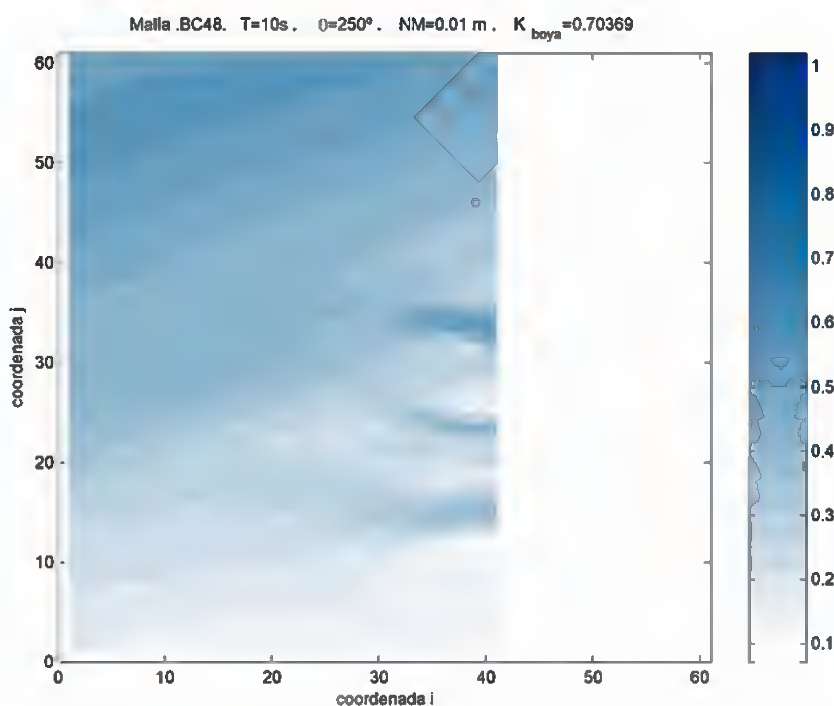


Figura 2.8. Propagaciones realizadas en zona correspondiente a la boya de A Coruña en Bajamar.



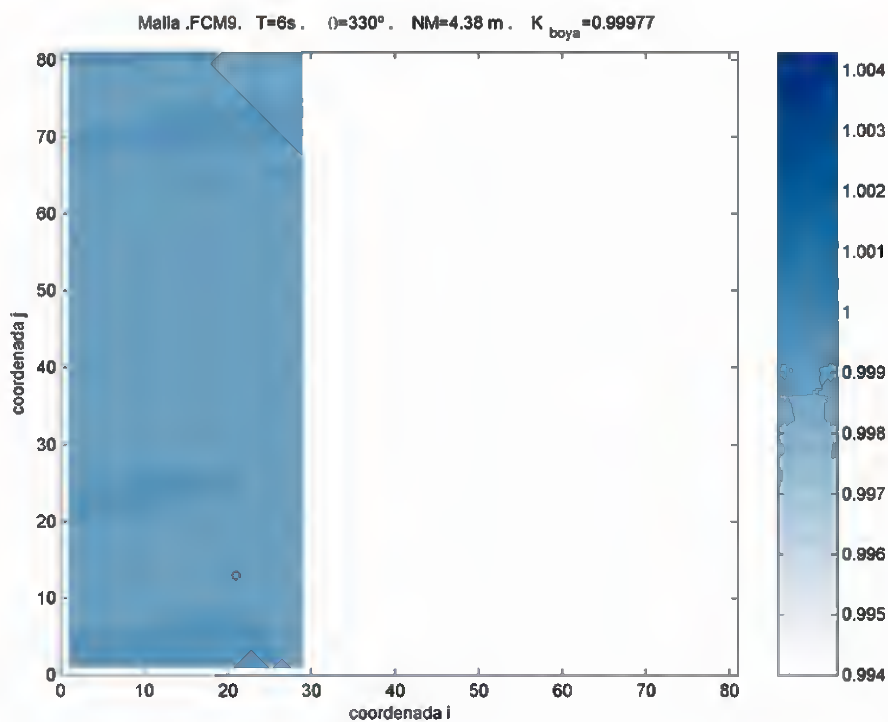


Figura 2.9. Propagaciones realizadas en zona correspondiente a la boya de A Coruña en pleamar.

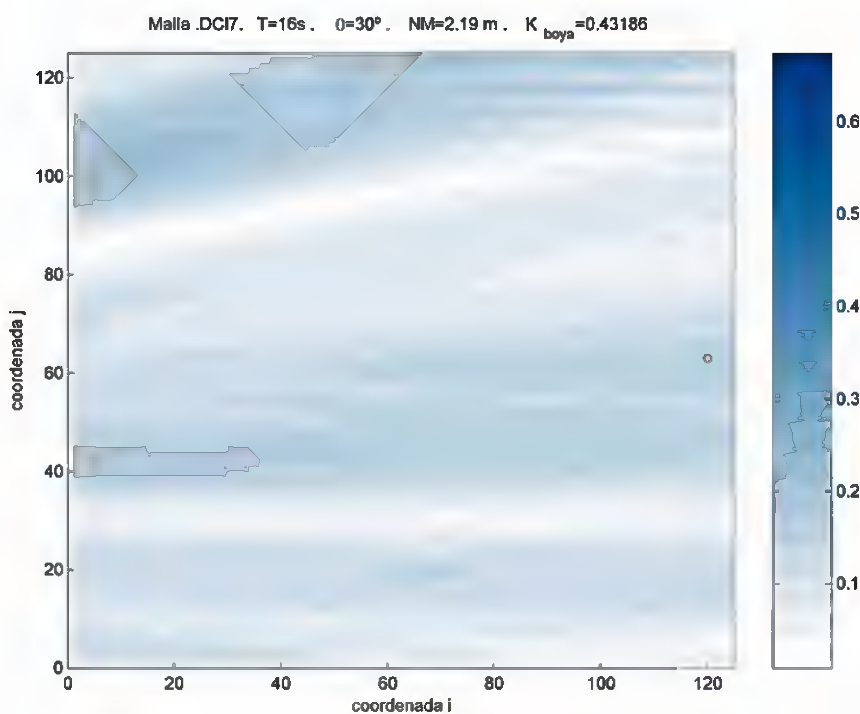


Figura 2.10. Propagaciones realizadas en zona correspondiente a la boya de A Coruña a media marea.







De cada una de las propagaciones realizadas, para cada nivel de marea, se obtiene un coeficiente de propagación,  $K_{boya}$ , y todos los coeficientes de propagación conforman una matriz de coeficientes de propagación (ver ejemplo de Silleiro en las figuras 2.11, 2.12 y 2.13), de la cual se obtiene la función de transferencia,  $K_p(T, \theta)$ , que determina el coeficiente de propagación de un oleaje monocromático, propagado desde profundidades indefinidas hasta la boya.

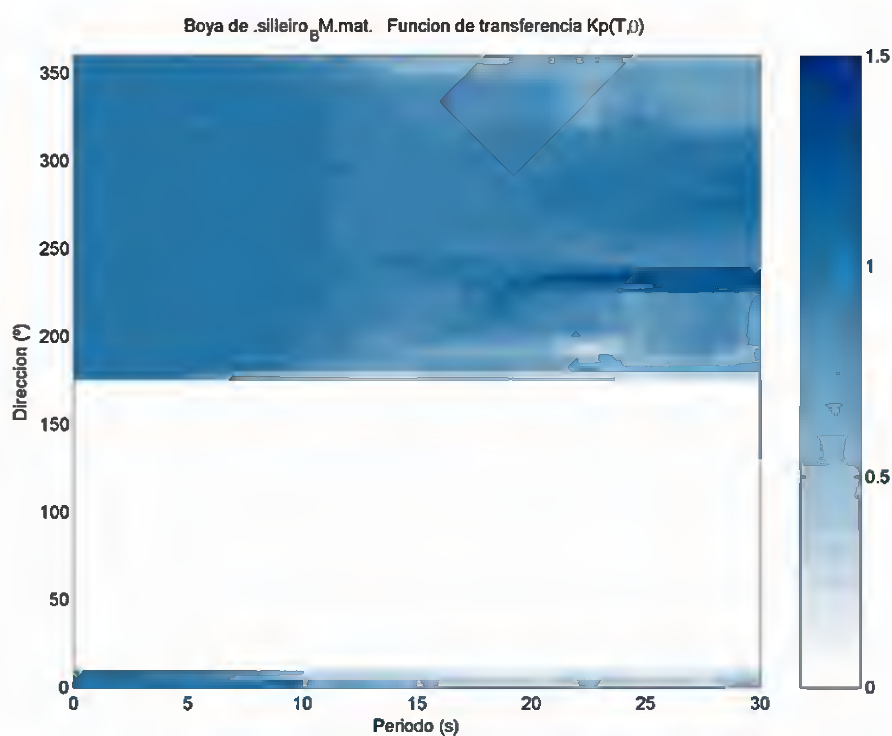


Figura 2.11. Matrices de Coeficientes de Propagación para la Bajamar en zona correspondiente a la boya de Silleiro.



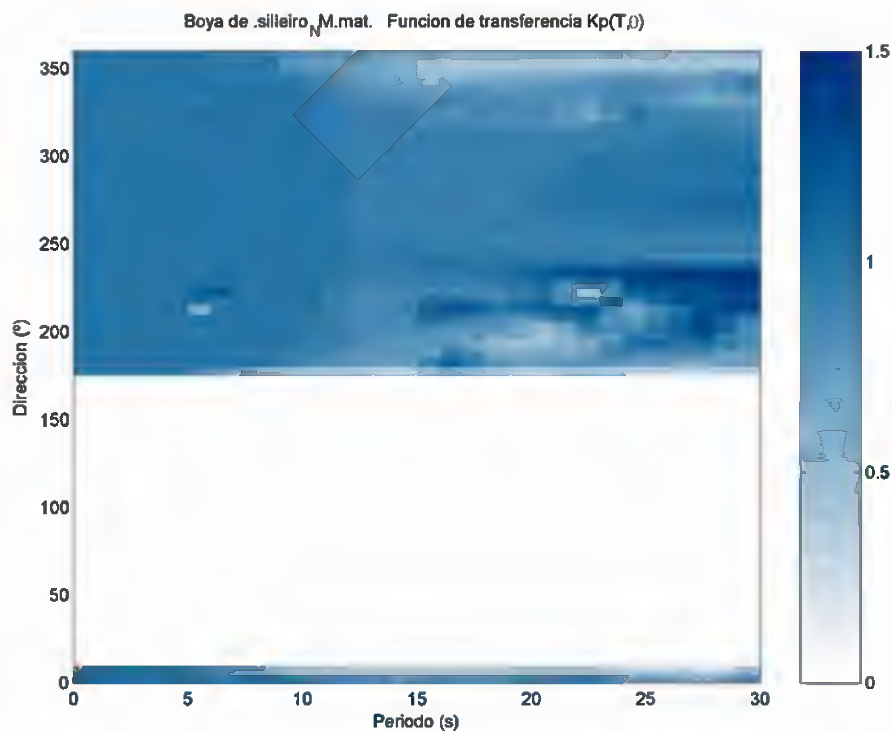


Figura 2.12. Matrices de Coeficientes de Propagacion para el Nivel medio, en zona correspondiente a la boya de Silleiro.

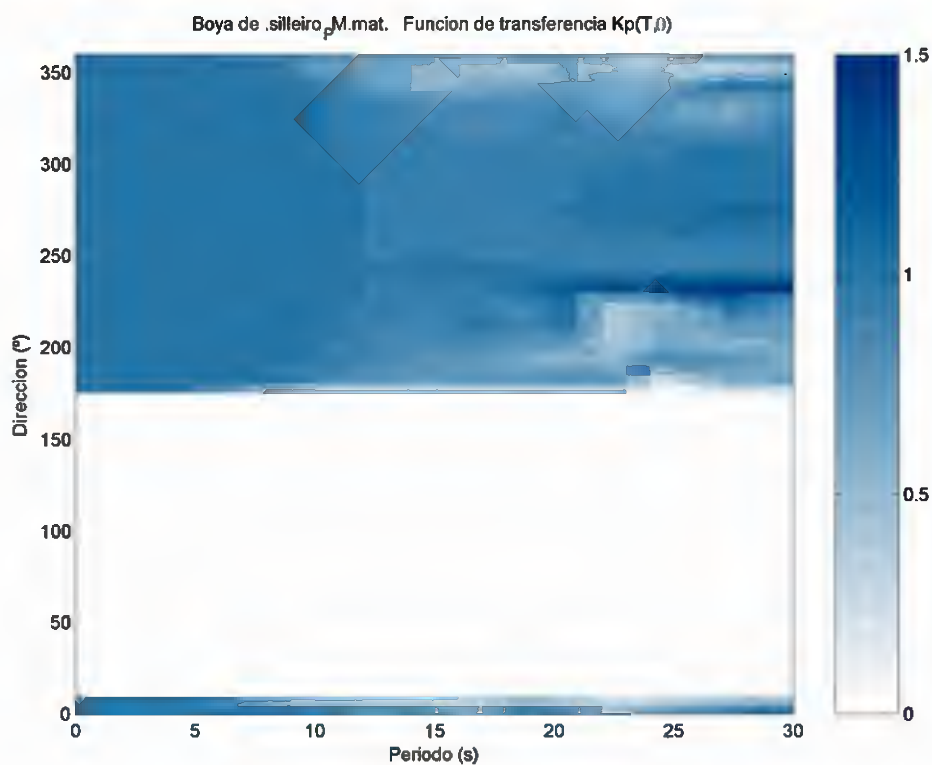


Figura 2.13.- Matrices de Coeficientes de Propagacion para la Pleamar, en zona correspondiente a la boya de Silleiro.





2.- Una vez que se conocen las funciones de transferencia para cada boya entre profundidades indefinidas y el punto objetivo (posición de la boya), se propagan todos los estados de mar desde el punto HIPOCAS hasta la boya, resultando:

$$S_p(f, \theta) = E_H(f, \theta) |Kf(f, \theta)|^2$$

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,  $\theta_{mp}$ , expresados de la siguiente manera:

$$H_{Sp} = 4.004 \sqrt{\int_0^\infty \int_0^\infty S_p(f, \theta) df d\theta}$$

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

$$\theta_{mp} = \arctan \left[ \frac{\int_0^\infty \int_0^\infty \sin \theta S_p(f, \theta) df d\theta}{\int_0^\infty \int_0^\infty \cos \theta S_p(f, \theta) df d\theta} \right]$$

Si se compara la base de datos de HIPOCAS, obtenida a partir de las propagaciones, con la serie de datos registrada en la boya situada en Alicante, se aprecia una alta correlación en el tiempo entre las dos series, pero con diferencias en la altura de ola (figura 2.14).





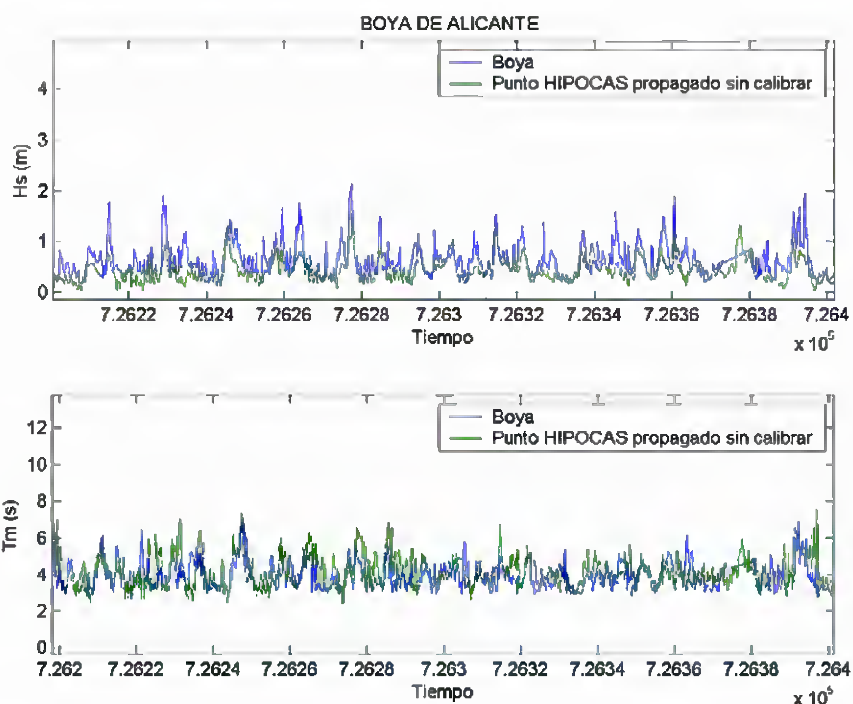


Figura 2.14. Comparación entre la serie de datos propagada sin calibrar de HIPOCAS y la serie de datos instrumental de la boya de Alicante

Por otro lado, la figura 2.15 muestra la comparación, percentil a percentil de probabilidad acumulada para la altura de ola significativa,  $H_s$ , de la serie de datos propagada sin calibrar de HIPOCAS y la serie de datos instrumental de la boya de Alicante, donde se pone de manifiesto la necesidad de realizar una calibración de los datos del modelo con los datos instrumentales, ya que las series presentan distintos regímenes (si fuesen iguales los puntos se situarían sobre la bisectriz).

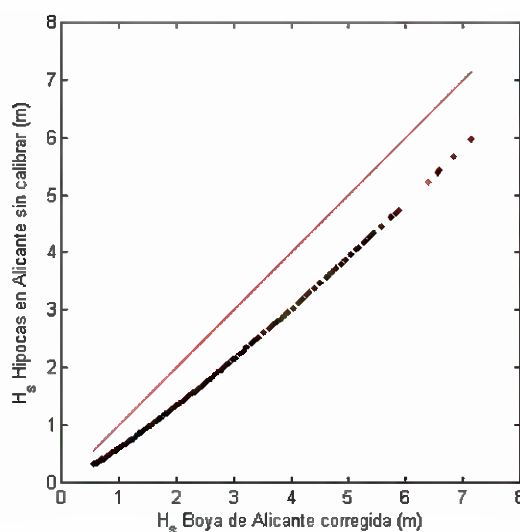


Figura 2.15. Comparación, percentil a percentil de probabilidad acumulada para la altura de ola significativa,  $H_s$ , de la serie de datos propagada sin calibrar de HIPOCAS y la serie de datos instrumental de la boya de Alicante





3.- Una vez que se tiene el clima marítimo propagado, caracterizado a partir de la variable tridimensional  $(H_S(t), T_m(t), \theta_m(t))$ , es decir, cada estado de mar,  $t$ , definido por su altura de ola significativa, su periodo medio y su dirección media, el objetivo es encontrar un polinomio de transformación de  $(H_S(t), T_m(t), \theta_m(t))$ , en el punto HIPOCAS, que mejor modele lo registrado en la boyas de medida.

La alta correlación observada entre los datos registrados por las boyas de medida y los datos de la serie HIPOCAS corregida tras la propagación anteriormente realizada (figura 2.14), conlleva a que se puedan expresar de manera fiable, los nuevos parámetros  $(H_S^*, T_m^* \dots)$ , con relaciones de tipo:

$$H_S^* = a_H + b_H H_S^{c_H}$$

$$T_m^* = a_T + b_T T_m^{c_T}$$

donde  $H_S$ , es la altura de ola significativa,  $H_S^*$ , es la altura de ola significativa corregida,  $T_m$ , es el periodo medio,  $T_m^*$ , es el periodo medio corregido,  $a_H, b_H, c_H$ , son los parámetros de ajuste para la altura de ola significativa y  $a_T, b_T$  y  $c_T$ , son los parámetros de ajuste para el periodo medio. Esta transformación se realiza por cuantiles, de manera que las distribuciones del punto HIPOCAS corregido-propagado y la boya, coincidan. En la figura 2.16 se muestra, para Alicante la primera transformación obtenida.

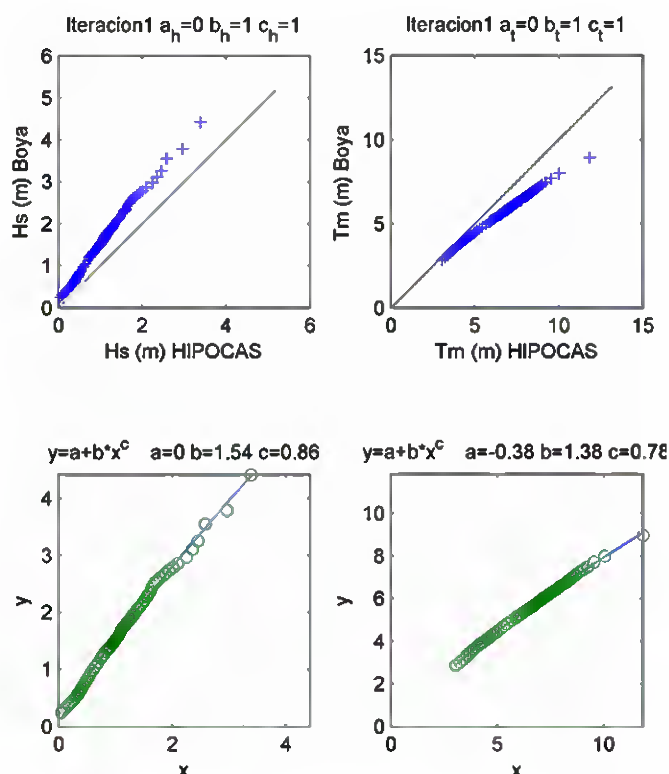


Figura 2.16. Parámetros obtenidos para la primera transformación obtenida en la boya de Alicante.



4.-Una vez obtenido dicho polinomio de transformación, éste se aplica a los datos del punto HIPOCAS en indefinidas para la transformación de los parámetros,  $H_s$  y  $T_m$ .

5.-Si dicha transformación varía los parámetros de la serie del punto HIPOCAS, esto a su vez modificará las propagaciones de los estados de mar, por lo que se debe repetir toda la metodología descrita hasta el momento desde el paso 2, para obtener un polinomio de transformación que haga que, los parámetros de los datos transformados tras la propagación del punto HIPOCAS y los registrados en la boya, converjan.

Este procedimiento es iterativo. Inicialmente, se suponen unos valores de  $a=0$ ,  $b=1$  y  $c=1$  tales que:

$$H_1 = a_0 + b_0 H_0^{c_0}$$

el resultado obtenido de esta primera iteración, es utilizado en la segunda iteración y éste a su vez en la siguiente, de forma que:

$$H_2 = a_1 + b_1 H_1^{c_1} = a_1 + b_1 (a_0 + b_0 H_0^{c_0})^{c_1}$$

$$H_3 = a_2 + b_2 H_2^{c_2} = a_2 + b_2 (a_1 + b_1 H_1^{c_1})^{c_2}$$

.....

$$H_n = a_{n-1} + b_{n-1} (H_{n-1})^{c_{n-1}}$$

Para el caso de la altura de ola, por ejemplo, los coeficientes finales se obtienen comparando los cuantiles de la serie inicial de HIPOCAS ( $H_1$ ), con la última transformación ( $H_n$ ), obteniéndose los valores finales de  $a_H$ ,  $b_H$  y  $c_H$ . En la figura 2.17, se muestra para Alicante, la función transformada final.

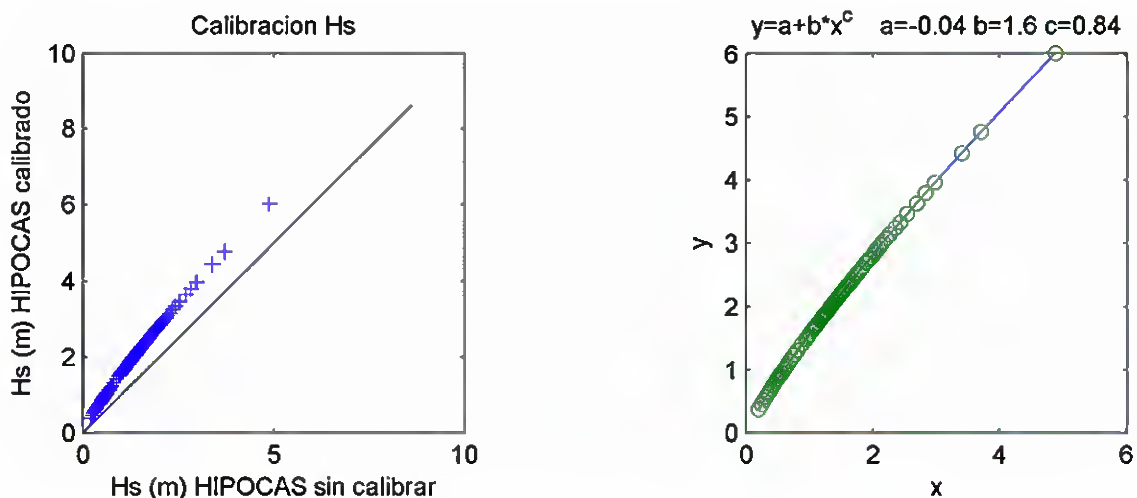


Figura 2.17. Parámetros obtenidos para la función transformada final, en la boya de Alicante





Este proceso se repite tantas veces como iteraciones se realicen, hasta que los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$ , no varíen significativamente y se pueda afirmar que éstos han convergido (figura 2.18). En general, en menos de 10 iteraciones se ha obtenido resultados satisfactorios para todos los casos analizados.

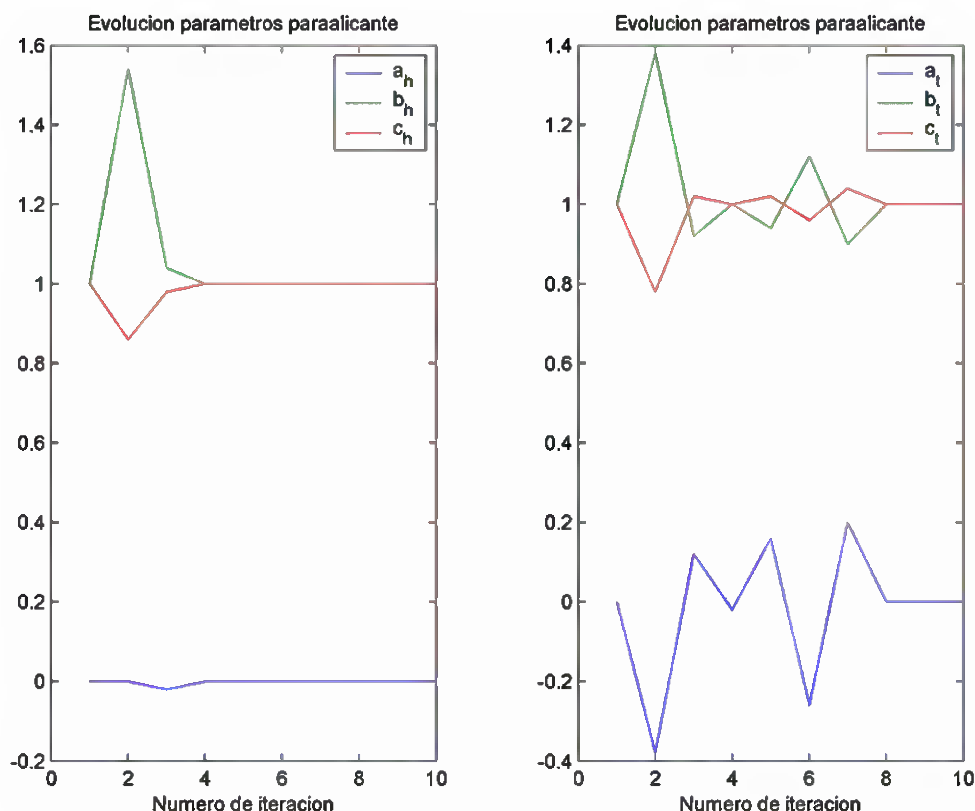


Figura 2.18. Evolución de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ , tras el cálculo iterativo en el punto HIPOCAS más cercano a la boya de Alicante

**6.-** Por último, se comparan los cuantiles de la serie de HIPOCAS calibrada propagada, con los cuantiles de la serie instrumental obtenida en cada una de las boyas (figura 2.19).

A partir de ésta serie corregida y calibrada, se pueden extraer los regímenes de los parámetros que definen el clima marítimo de una zona, evaluar sus tendencias temporales y espaciales y poder así cuantificar teóricamente, los efectos que estas variaciones pueden causar en la costa.



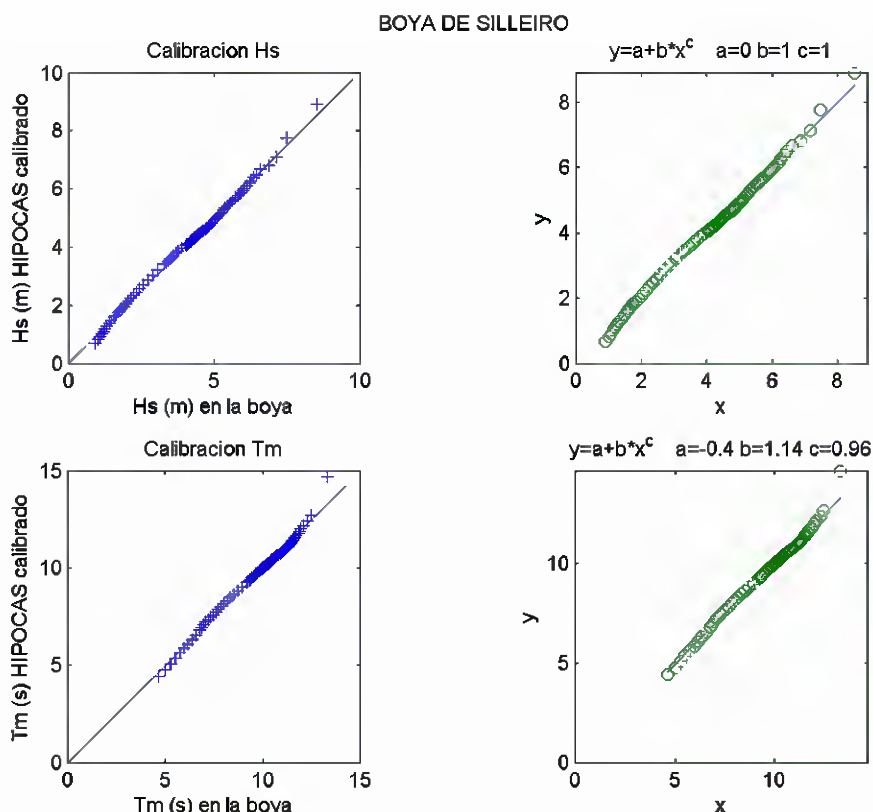


Figura 2.19. Comparación entre las series de datos de  $H_s$  y  $T_m$ , de la boya e HIPOCAS calibrado para el punto HIPOCAS más cercano a la boya de Silheiro.

### 2.3. Validación de la calibración realizada

Se ha validado el modelo utilizado para la calibración de las series de datos de HIPOCAS, frente a los datos recogidos por las boyas de medida, para comprobar que las calibraciones realizadas son correctas.

A modo de ejemplo se muestran las calibraciones realizadas entre las boyas situadas en Alicante, Bilbao y Silheiro y los puntos HIPOCAS más cercanos a éstas. Si se comparan las series de datos de  $H_s$  y  $T_m$ , (figuras 2.20, 2.21 y 2.22), se puede observar como existe una alta correlación entre los datos instrumentales registrados por las boyas y los datos de HIPOCAS calibrados.



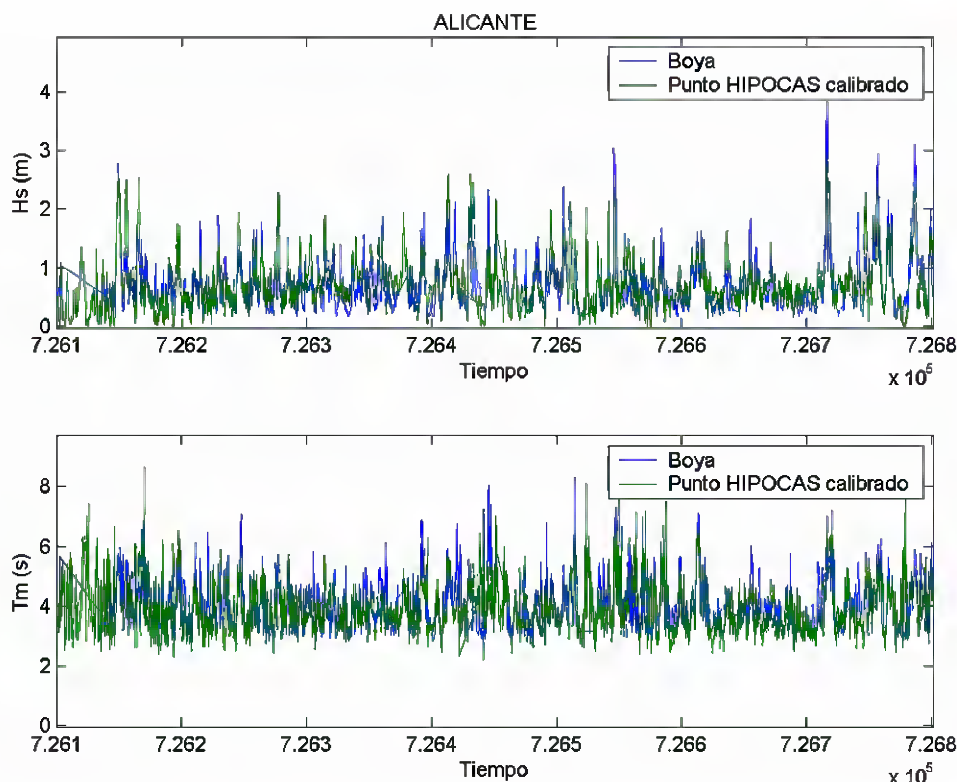


Figura 2.20. Comparación entre las series de datos de  $H_s$ , del punto HIPOCAS propagado calibrado más cercano a la boya de Alicante y serie instrumental de la boya de Alicante.

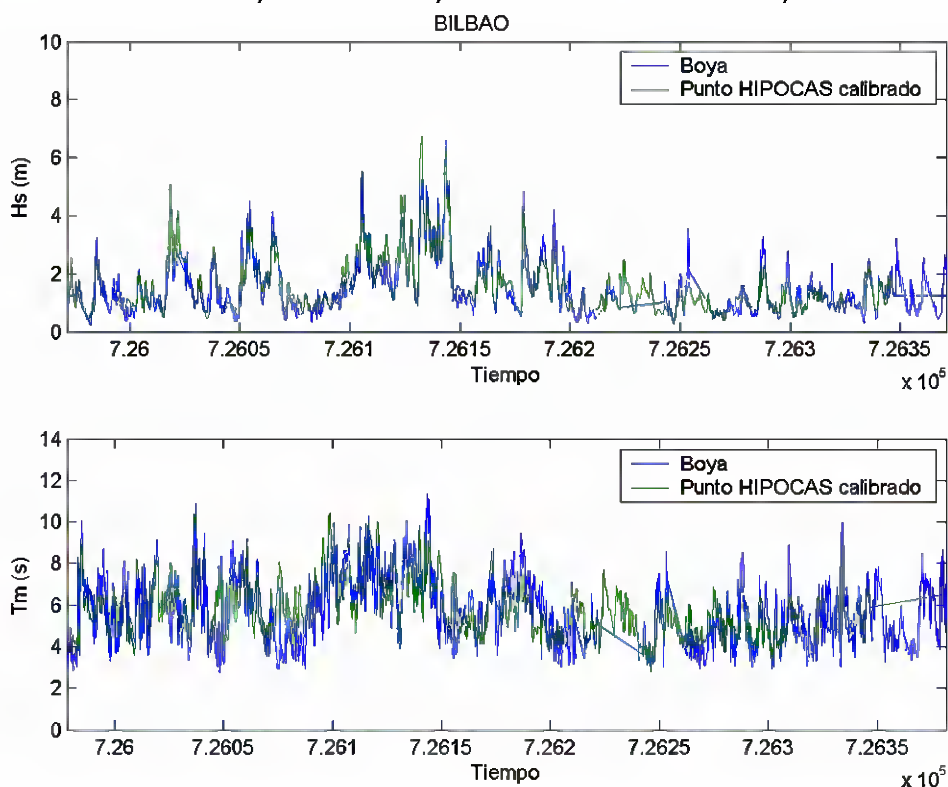


Figura 2.21. Comparación entre las series de datos de  $H_s$ , del punto HIPOCAS propagado calibrado más cercano a la boya de Bilbao y serie instrumental de la boya de Bilbao.



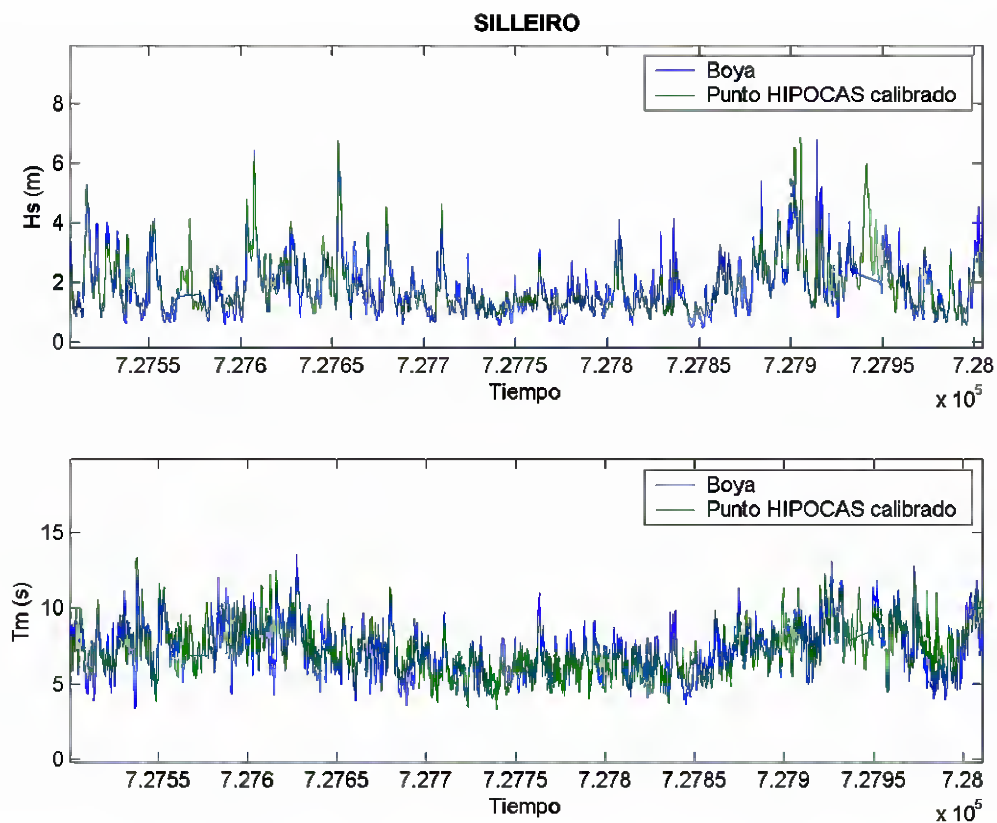


Figura 2.22. Comparación entre las series de datos de  $H_s$ , del punto HIPOCAS propagado calibrado más cercano a la boya de Silleiro y serie instrumental de la boya de Silleiro.





En la tabla 2.1, se muestra los coeficientes finales obtenidos para las boyas analizadas:

BOYA	$H_s$			$T_m$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Alicante	0.02	1.54	0.88	0.02	1.92	0.72
Cabo de Gata	0.02	2	0.96	1.9	1.58	0.7
Cabo de Palos	-0.46	1.98	0.72	1.5	1.42	0.78
Cap de Pera	-0.04	1.56	1	0.32	1.98	0.76
Ceuta	0.22	0.74	1.42	1.5	1.62	0.88
Malaga	0.16	1.28	1.22	2.46	1.24	0.7
Palamos	-0.48	1.9	0.64	0.46	1.4	0.9
Tarragona	-0.38	1.62	0.56	0.08	1.92	0.66
Valencia	-0.26	1.92	0.7	0.26	1.94	0.68
Llobregat	-0.4	2	0.66	0.94	2	0.74
Rosas	-0.36	2	0.76	1.68	1.94	0.74
Tordera	-0.32	1.9	0.78	1.02	1.98	0.76
Tortosa	0.02	2	0.74	-0.02	2	0.76
Bilbao	0.12	0.94	0.92	1.06	0.36	1.14
Cadiz	0.12	0.92	1	0.8	0.2	1.44
A Coruña	0.16	0.78	0.98	2	0.22	1.34
Gijon I	-0.48	1.36	0.86	0.14	0.76	0.98
Las Plamas I	0.82	0.24	1.64	0.96	0.24	1.36
Silleiro	0.68	0.5	1.26	0.98	0.54	1.06
Tenerife	0.72	0.68	1.22	0.22	1.98	0.54
Faro	0.86	0.74	1.18	2.44	0.46	0.86
Figueira da Foz	-0.46	1.4	0.76	2.26	0.2	1.4
Sines	-0.5	1.6	0.84	2.32	0.26	1.3

Tabla 2.1. Coeficientes obtenidos para las boyas analizadas





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 3. MODELO DE CALIBRACIÓN ESPACIAL**

---



### 3. MODELO DE CALIBRACIÓN ESPACIAL

#### 3.1. Introducción

El objetivo de la calibración es encontrar la transformación de cada parámetro de la base de datos de HIPOCAS que mejor modele lo registrado en las redes de medida instrumentales.

Debido a la complejidad del problema, es necesario fijar a priori la escala temporal de calibración del problema. Así, la calibración se puede realizar en el dominio del tiempo o desde un punto de vista probabilista:

- **Dominio del tiempo:** Es necesario calibrar las series temporales instantáneas (p.e. altura de ola significativa horaria) o series temporales agregadas (p.e. altura de ola significativa media diaria-mensual-estacional).
- **Aproximación probabilista:** Se calibra la base de datos agregada en términos de la evolución temporal de los regímenes de cada parámetro.

Para los fines de este proyecto se ha considerado más adecuada la aproximación probabilista. De esta manera, en lugar de centrarse en las series temporales instantáneas, se va a trabajar con los regímenes de los parámetros (ver figura 3.1).

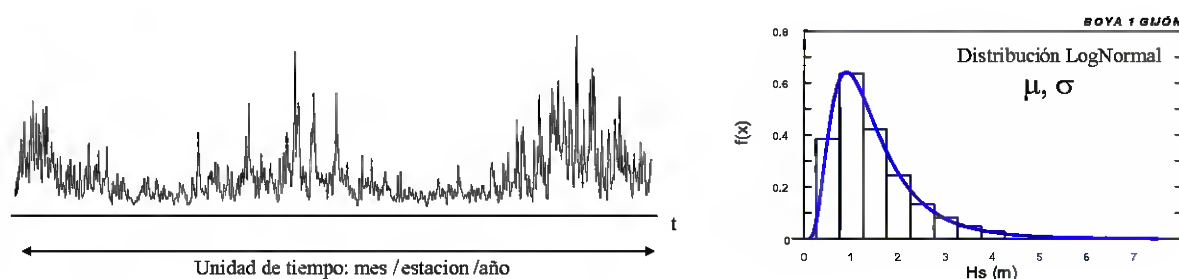


Figura 3.1. Ejemplo de agregación de serie temporal de altura de ola significativa

Por otro lado, existen diversos estudios relacionados con la transformación de variables geofísicas que se basan fundamentalmente en la reducción de las dimensiones del problema (análisis de componentes principales o funciones empíricas ortogonales).

Otra cuestión a tener en cuenta es que, la mayor parte de los estudios de transformación de los parámetros estadísticos de un estado de mar, se han realizado para transformar la altura de ola visual en altura de ola significativa y, en general, son relaciones del tipo:



$$H_s = a + bH_v^c$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los parámetros de ajuste,  $H_v$ , es la altura de ola visual registrada por los barcos en ruta y  $H_s$ , es la altura de ola significativa corregida.

### 3.2. Esquema de la metodología

Para mostrar los pasos seguidos en la calibración espacial, se toma como ejemplo la altura de ola significativa, siendo un procedimiento similar el que se seguiría para la calibración de cualquier otro parámetro. Los pasos son los siguientes:

- 1) Se selecciona la variable altura de ola significativa  $H_s(x, \tau)$ , siendo  $\tau$  la variable tiempo elegida, el mes ( $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}\}$ ) y  $\mathbf{x}$  la variable que define la posición de los puntos en la malla de HIPOCAS ( $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ ). Se tiene una serie de  $H_s$  para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ . En la figura 3.2 se muestra como se agregan las series de datos para la definición de las 12 nuevas unidades temporales.

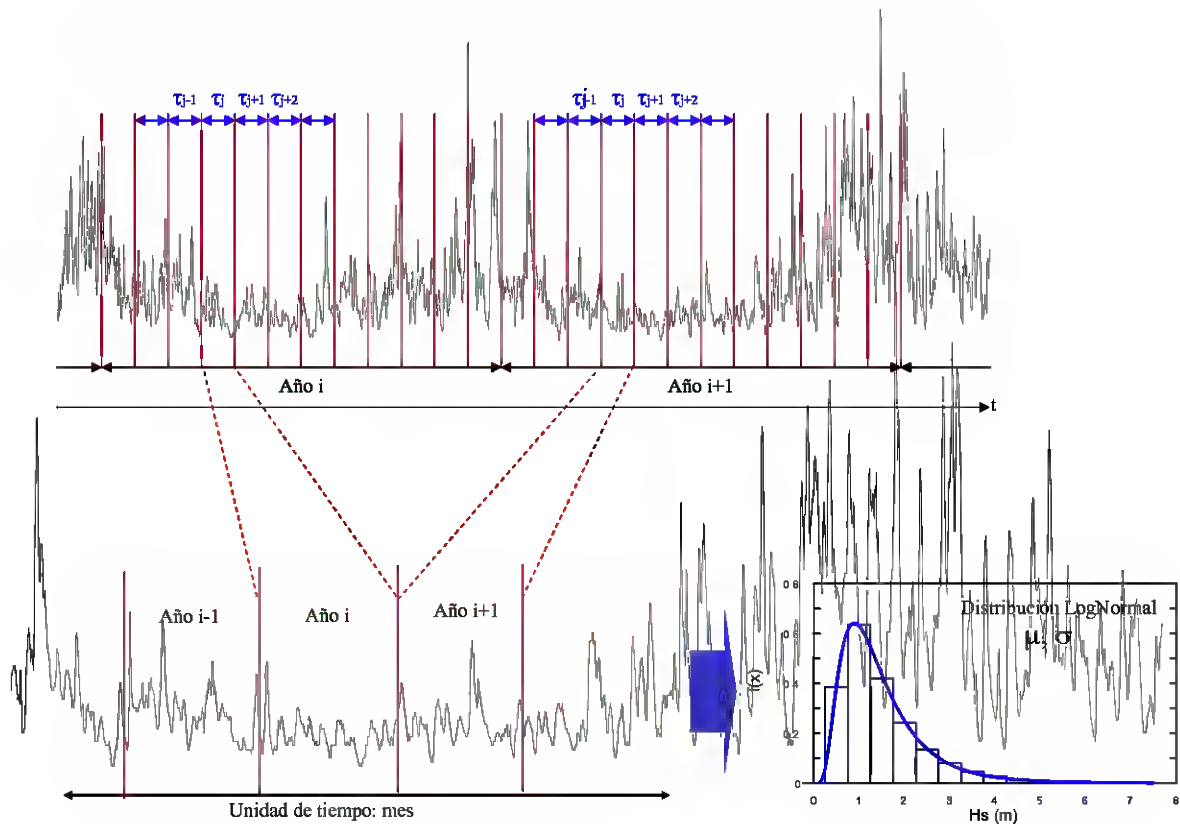


Figura 3.2. Ejemplo de agregación de los datos en meses





2) Se definen los distintos regímenes en los que se puede separar la función de distribución empírica agregada de  $H_s$  para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ . Por ejemplo, se define el régimen medio entre el 20% y el 99.5% de probabilidad acumulada y el régimen medio-alto entre el 99.5% y el 100%. En la figura 3.3 se comprueba como, en Cabo de Palos, la tendencia del régimen cambia en torno al 99.5% de probabilidad acumulada, este quiebro se produce en todas las posiciones. En la figura 3.3 se representa la serie  $H_s$  en dos papeles probabilísticos distintos.

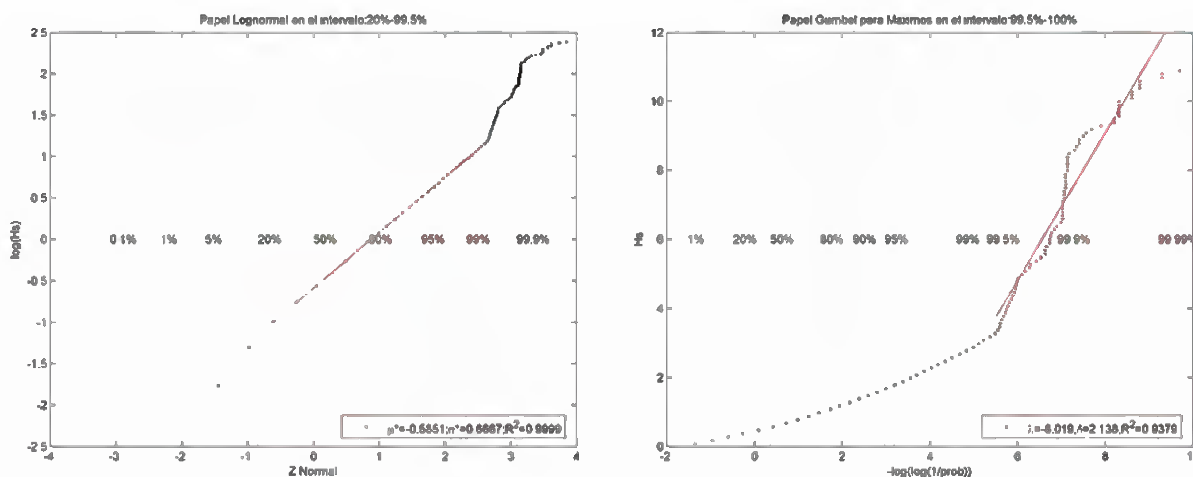


Figura 3.3. Régimen medio (derecha) y el régimen medio-alto (izquierda) de  $H_s$  para  $\tau_{12}$ , en la posición de la boya de Cabo de Palos

3) Se asume para cada régimen de  $H_s$  la distribución a la que mejor se ajusta. Así, como se muestra en la figura 3.3, el régimen medio se ajusta a la distribución Lognormal y el régimen medio-alto se ajusta a la distribución Gumbel de máximos.

Distribución Lognormal:

$$y = F(x) = \Phi\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right)^2\right] dx; -\infty < x < \infty$$

donde:

$\Phi(z)$  es la función de distribución de la variable  $z$  normal estándar  $N(0,1)$

$\mu^*$  es la media de la distribución normal original (parámetro de localización)

$\sigma^*$  es la desviación típica de la distribución normal original (parámetro de escala)





Distribución Gumbel de máximos:

$$y = F(x) = \exp \left[ -\exp \left( \frac{-(x-\lambda)}{\delta} \right) \right]; -\infty < x < \infty$$

donde:

$\lambda$  es el parámetro de localización

$\delta$  es el parámetro de escala

- 4) Se obtienen los parámetros de las distribuciones de cada régimen para cada  $\mathbf{x}_i$  y para cada  $\tau_j$  (p.e. la media  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  y la desviación típica  $\sigma(\mathbf{x}, \tau)$ , de la Lognormal). En la figura 3.4 se representa la distribución espacial en el mar Mediterráneo de los parámetros  $\mu(\mathbf{x}, \tau_1)$  y  $\sigma(\mathbf{x}, \tau_1)$  (del mes de enero) de la distribución Lognormal del régimen medio de  $H_S$ . En la citada figura se nota como ambos parámetros aumentan en mar abierto, debido a la mayor magnitud y variabilidad de los oleajes en estas zonas.

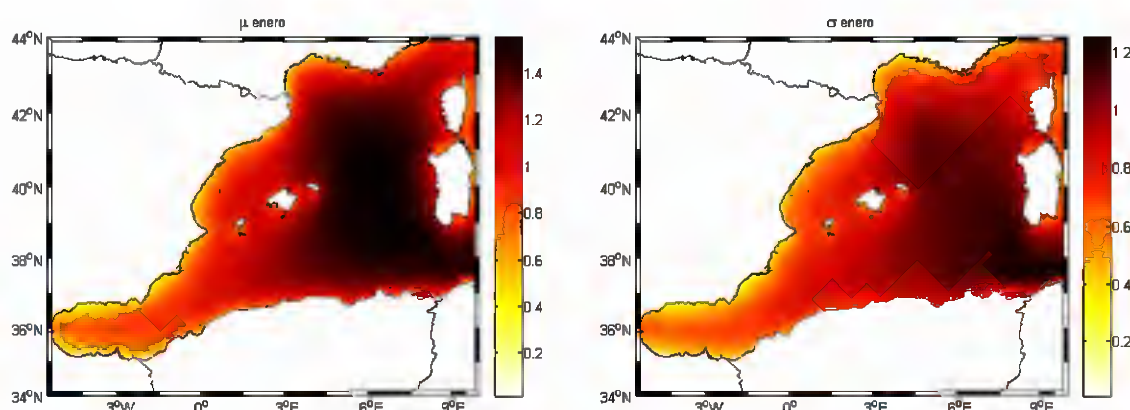


Figura 3.4: Distribución espacial, de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal, para  $\tau_1$

- 5) Se aplica la técnica EOF para obtener los modos descomponiendo cada parámetro espacio-temporal en una serie de  $n$  funciones ortogonales (CIESLIKIEWICZ, 1996 y BALDACCI, 2001). Por ejemplo, para una variable genérica  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  (que podría ser  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  del ajuste Lognormal entre el 20% y el 99.5% de probabilidad acumulada), se obtiene:

$$Z_T(\mathbf{x}, \tau) = Z(\mathbf{x}, \tau) - Z_{MT}(\mathbf{x})$$

$$Z_T(\mathbf{x}, \tau) = f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + \dots + f_i(\mathbf{x})g_i(\tau) + \dots + f_n(\mathbf{x})g_n(\tau)$$

donde  $Z_{MT}(\mathbf{x})$  es la media temporal,  $f_i(\mathbf{x})$  es el  $i$ -ésimo modo espacial y  $g_i(\tau)$  la  $i$ -ésima amplitud temporal. En la figura 3.5 se representan la media temporal y los tres





primeros modos de la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau) = \mu(\mathbf{x}, \tau)$  de la distribución Lognormal ajustada para el régimen medio.

Los siguientes modelos espaciales representan variaciones espaciales tipo N-S, en el 2º modo espacial, o E-O, en el 3º modo espacial.

La representación de los modos no tiene por qué tener ningún sentido físico, pero en la figura 3.5 se puede observar que la amplitud temporal del primer modo representa la fluctuación anual invierno-verano. En el resto de modos se observan unos modos espaciales que representan la variación Norte-Sur, el segundo modo espacial y una variación Este-Oeste, el tercer modo espacial. Estos patrones de comportamiento se repiten para muchas de las variables espacio-temporales denominadas  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ .

- 6) De los inicialmente  $n$  modos se seleccionan los  $p$  primeros modos que deberán explicar como mínimo el 95% de la varianza de la variable  $Z_T(\mathbf{x}, \tau)$  (p.e.  $p = 4 < n$ ).

$$Z_T(\mathbf{x}, \tau) = f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + \dots + f_p(\mathbf{x})g_p(\tau)$$

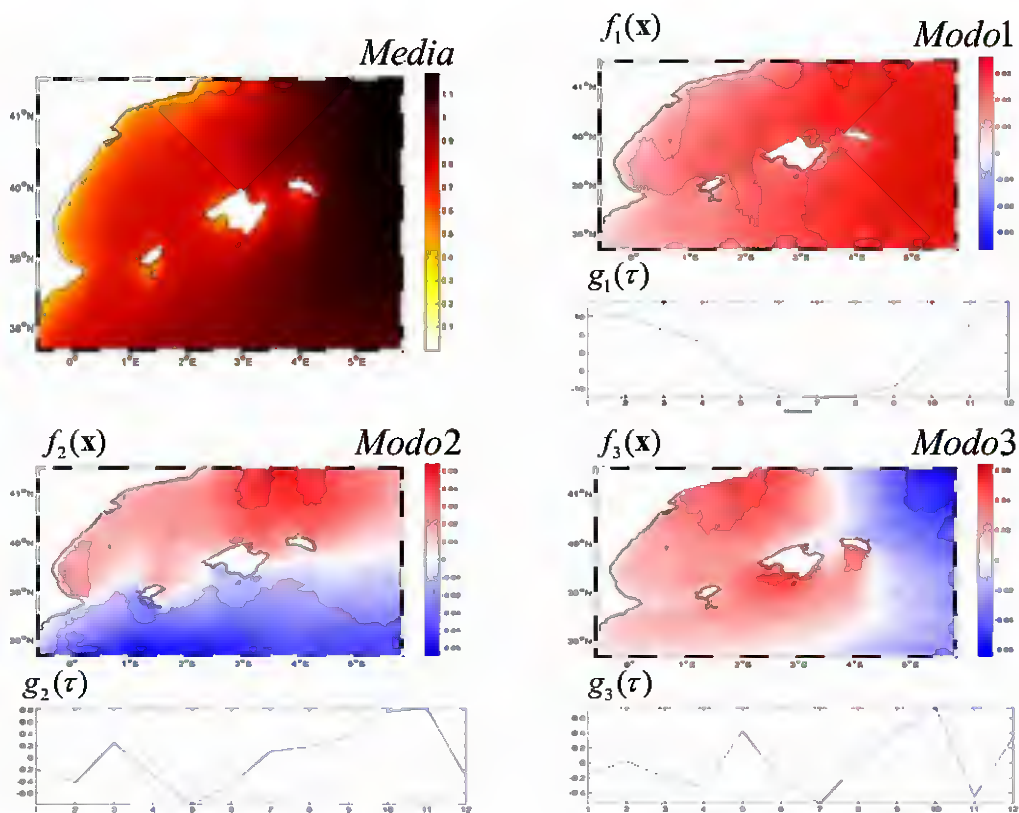


Figura 3.5. Ejemplo de la media temporal, los tres primeros modos espaciales y sus respectivas amplitudes temporales de  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$





- 7) Se asume como hipótesis que el valor calibrado  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  es una combinación potencial de cada uno de los modos, de tal manera que una de las posibles formas en las que se puede expresar es:

$$Z_c(\mathbf{x}, \tau) = a_0 Z_{MT}(\mathbf{x})^{b_0} + a_1 f_1(\mathbf{x}) g_1(\tau)^{b_1} + a_2 f_2(\mathbf{x}) g_2(\tau)^{b_2} + \dots + a_p f_p(\mathbf{x}) g_p(\tau)^{b_p} + c_0$$

donde  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  son las incógnitas a obtener.

En la figura 3.6 se esquematiza la idea de que deformando cada variable espacio-temporal de HIPOCAS (mediante los parámetros  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$ ) se logra aproximar a las variables determinadas a partir de las series de datos de las boyas.

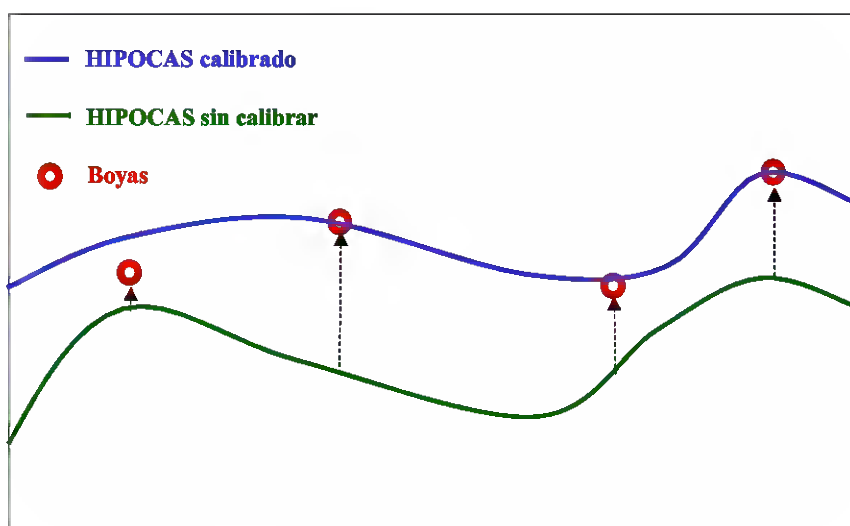


Figura 3.6. Esquema del concepto de calibración

- 8) Se calcula, para cada boya, la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  que queremos calibrar, que llamaremos  $Z_B(\mathbf{x}, \tau)$ . Ésta deberá estar definida en los mismos términos que  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$ , es decir, en los mismos  $\mathbf{x}$ ,  $\tau$ , régimen, distribución y con las mismas características del oleaje. Por ejemplo, si una boya está fondeada a profundidades reducidas, su registro de oleaje deberá propagarse hasta la posición del punto HIPOCAS más cercano (en profundidades indefinidas).
- 9) Para obtener  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  se evaluará la diferencia entre  $Z_B(\mathbf{x}, \tau)$  y  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$ , en los mismos  $\mathbf{x}_i$  y  $\tau_j$ . Resultando finalmente un problema de optimización







en el cual se debe definir la función objetivo a minimizar ( $J$ ), la cual se puede definir como:

$$J = \sum_j \left\{ \sum_i \left\{ \left[ \frac{Z_B(\mathbf{x}, \tau) - Z_C(\mathbf{x}, \tau; \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\})}{R(\mathbf{x}, \tau)} \right]^2 P(\mathbf{x}, \tau) \right\} \right\}$$

donde  $R(\mathbf{x}, \tau)$  es el término que relativiza el error (p.e. la media temporal de cada boya  $R(\mathbf{x}) = \overline{Z_B(\mathbf{x}, \tau)}$ ) y  $P(\mathbf{x}, \tau)$  es el término que da más o menos peso a cada sumando de

la función objetivo. Se ha optado por definir la función peso como:  $P(\mathbf{x}, \tau) = \frac{P(\mathbf{x})}{\sum_i P(\mathbf{x}_i)}$ ,

siendo,  $P(\mathbf{x})$ , proporcional al tramo de costa sobre el que tiene influencia cada boya. En la figura 3.7 se muestran los pesos utilizados para las boyas del mar Mediterráneo.

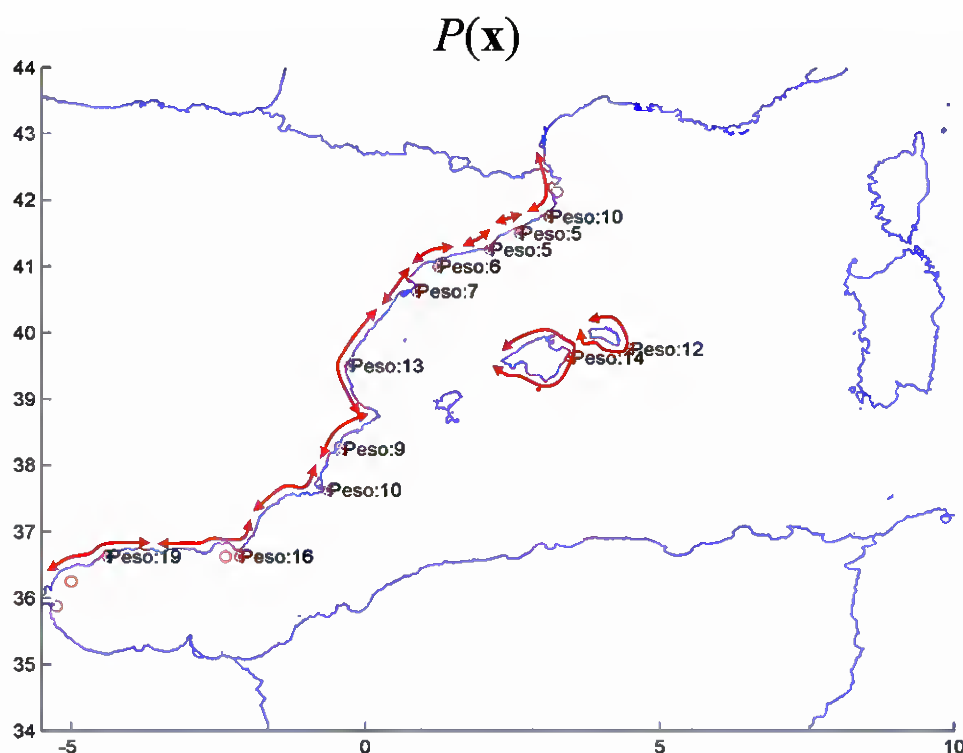


Figura 3.7. Pesos asociados a las boyas del mar Mediterráneo

- 10) Una vez definida la función objetivo se obtiene la combinación de  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$  que produce el mínimo error cuadrático relativo







ponderado entre los datos de HIPOCAS calibrados y las boyas de medida (minimiza la función objetivo mediante el método shuffled complex evolution, SCE-UA (DUAN, 1992 y DUAN, 1994)). En la figura 3.8 se representa como el método SCE-UA minimiza el error cometido en la calibración ( $J$ ) de los parámetros del régimen medio de una zona del mar Mediterráneo.

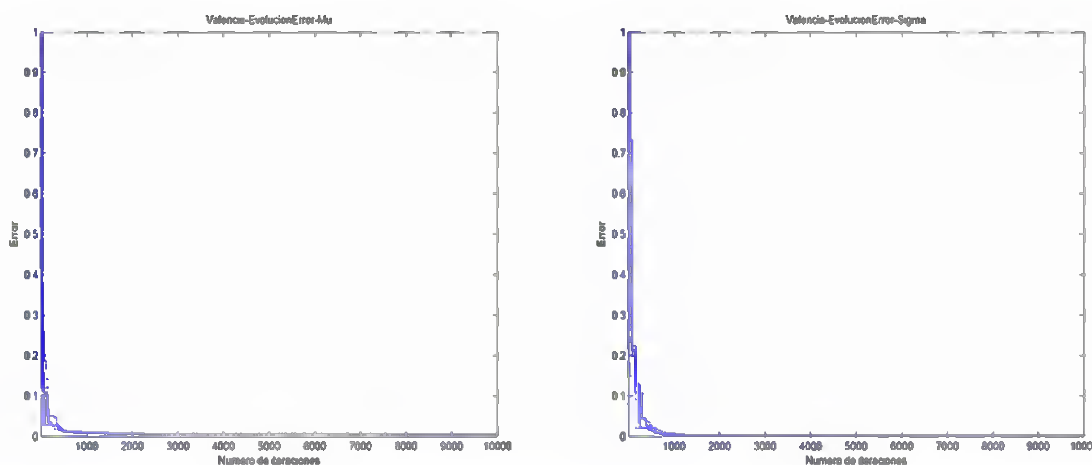


Figura 3.8: Evolución de  $J$  para  $\mu$  y  $\sigma$  en la calibración del régimen medio de  $H_s$

En la figura 3.9 se muestran los resultados de la calibración del régimen medio de  $H_s$  en la misma zona en la que, en la figura 3.8, se mostró el error cometido. En la figura 3.9  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  son respectivamente  $\{A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, T\}$ .

Valencia-Parametros

**Parametros de la calibración de  $\mu$  y  $\sigma$  (lognormal) con 4 modos:**

**Parametro  $\mu$  (lognormal):**

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.00578  
 A1=1.06; A2=1.55; A3=1.50; A4=1.45; A0=1.39  
 B0=0.74; B1=1.16  
 T=0.00

**Parametro  $\sigma$  (lognormal):**

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.00284  
 A1=1.19; A2=1.26; A3=1.20; A4=1.50; A0=1.76  
 B0=2.06; B1=1.03  
 T=0.28

Longitud inicial=-1.500

Latitud inicial=37.250

Longitud final=3.125

Latitud final=40.250

Figura 3.9. Resultados de la calibración del régimen medio en una zona del mar Mediterráneo





11) Con los valores obtenidos de la minimización de la función objetivo de los estimadores  $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_p, b_0, b_1, b_2, \dots, b_p, c_0\}$ , se calcula  $Z_c(x, \tau)$ . En la figura 3.10 se comparan, para la calibración de  $\mu(x, \tau)$  de la distribución Lognormal ajustada para el régimen medio en una zona del mar Mediterráneo, los valores antes y después de calibrar de HIPOCAS en las posiciones de las boyas, con los de las boyas. En esta figura se observa como HIPOCAS tras la calibración predice prácticamente lo mismo que registran las boyas, verificando la bondad del método de calibración.

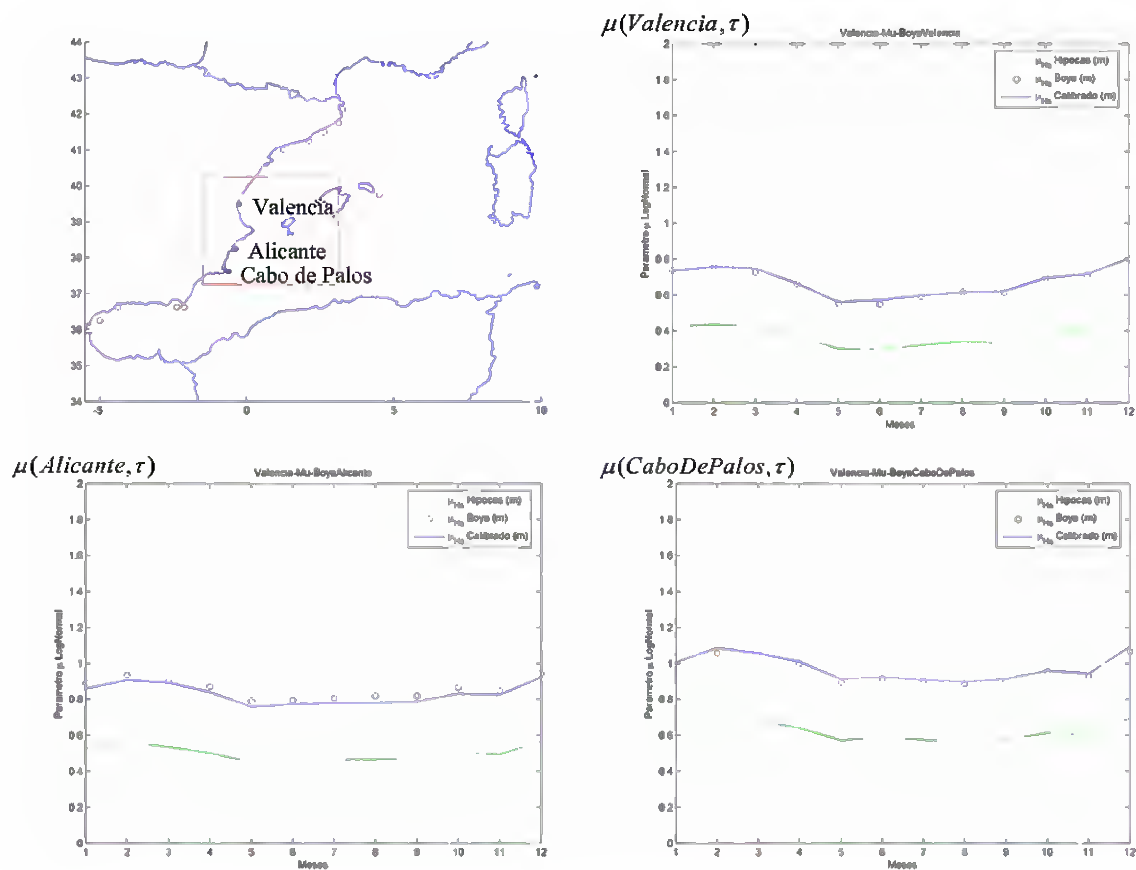


Figura 3.10. Localización de las boyas de la zona calibrada y comparación de la evolución temporal del parámetro  $\mu$  en Valencia, Alicante y Cabo de Palos.

12) Se calibra, para cada régimen, todos los parámetros de cada distribución; se repite para cada parámetro desde el paso 5) al 11). En la figura 3.11 se comparan los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  (de la distribución Lognormal), antes y después de calibrar con los de las boyas corregidas (divididos entre la media anual de las boyas corregidas); constatándose la mejora producida en la calibración del régimen medio, pues tras la calibración los





puntos se aproximan a la bisectriz, mostrando la semejanza entre los parámetros de las boyas y los de HIPOCAS calibrado.

Así, por ejemplo, en la figura 3.12 se representa la distribución espacial de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  del régimen medio para el mes de enero una vez calibrados. Nótese que se disponen distribuciones espaciales análogas a las de la figura 3.12 para cada uno de los doce meses (doce regímenes medios mensuales). En la figura 3.13 se muestra, asimismo, la media anual de  $\mu$  y de  $\sigma$ .

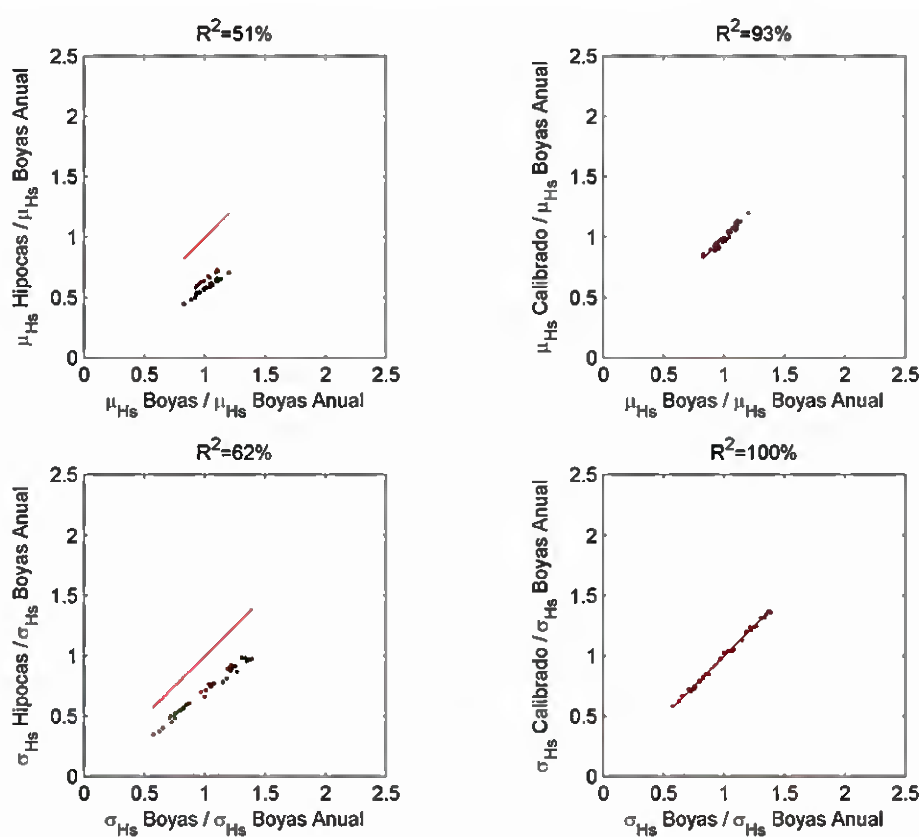


Figura 3.11. Comparación relativa de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  antes y después de calibrar.



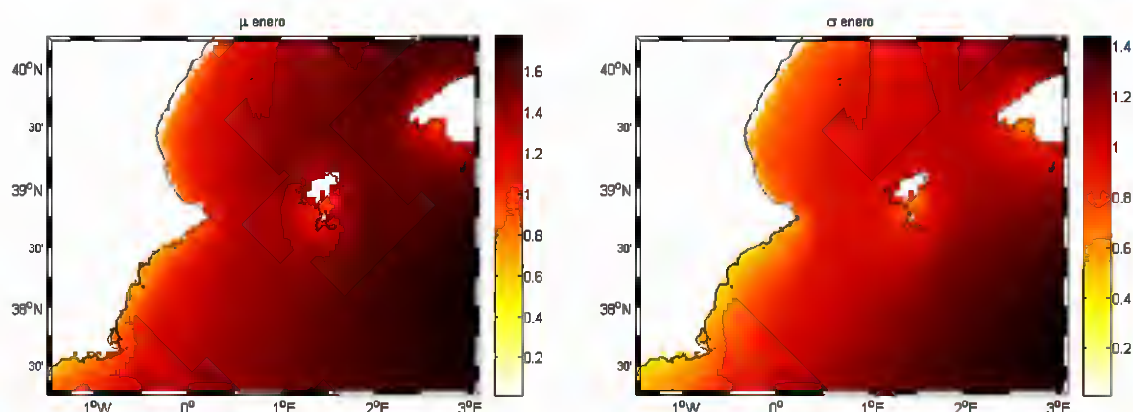


Figura 3.12. Evolución espacial de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  calibrados para  $\tau_1$ .

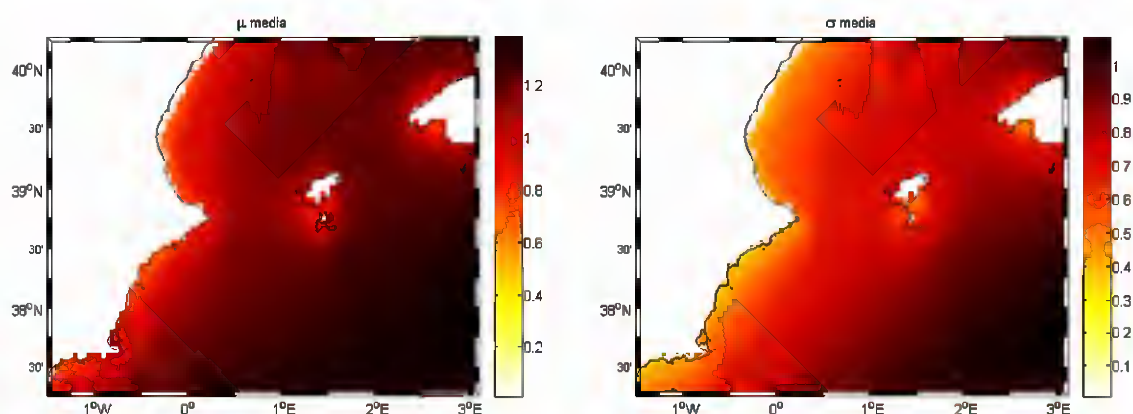


Figura 3.13. Evolución espacial de la media temporal de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  calibrados.

- 13) Una vez calibrados todos los parámetros de todos los regímenes de la altura de ola significativa ( $Z(x, \tau)$ ), se hace una simulación de Monte Carlo con estos parámetros calibrados para construir una serie de alturas de ola significantes para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ . Se simula una serie de  $H_S$  calibrada para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ .
- 14) Se define la función potencial que compara, en cada  $x_i$ , la serie de  $H_S$  inicial ( $H_S$ ) con las series simuladas de  $H_S$  calibrada ( $H_{S,c}$ ) por percentiles. Por ejemplo, una posible transformación potencial, definida para todo el campo de alturas de ola, podría ser:

$$H_{S,c} = bH_S^c$$

siendo  $b$  y  $c$  los parámetros finales de la calibración en cada posición. En la figura 3.14 se ajusta esta transformación potencial para un punto, determinándose los parámetros  $b$  y  $c$ .



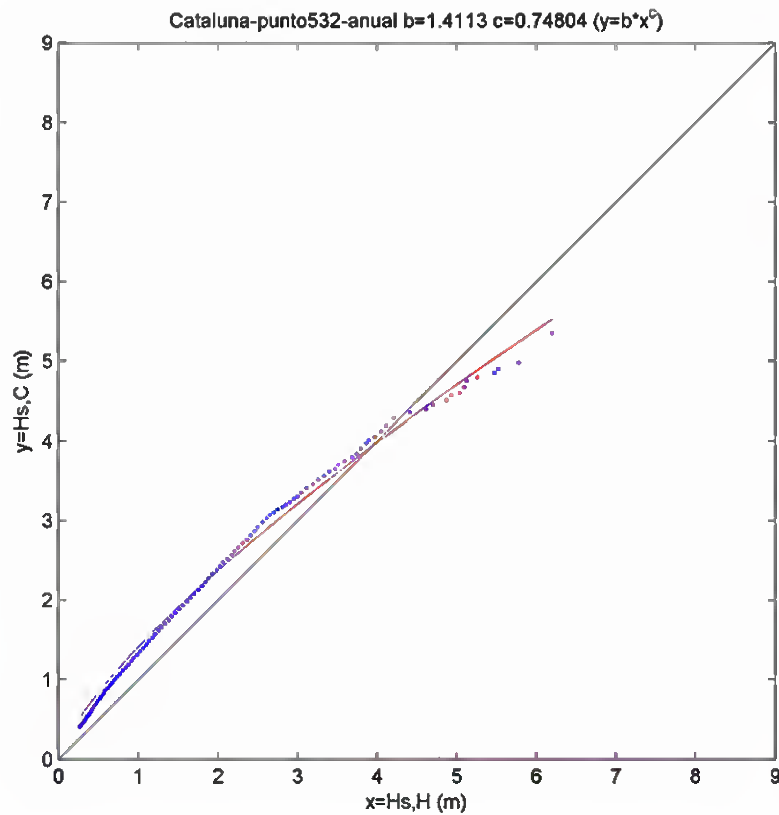


Figura 3.14. Ajuste a  $H_S, c = bH_S^c$  en la posición de la boya de Tortosa

- 15) Finalmente, se ajusta a la función potencial definida anteriormente, determinándose los parámetros finales de ésta (p.e.  $b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$ ) para cada  $\mathbf{x}_i$ , en los que se resume toda la información de la calibración de la base de datos de HIPOCAS y se recupera la información instantánea del tiempo. En la figura 3.15 se muestra la distribución espacial de  $b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$  para una zona del mar Mediterráneo.

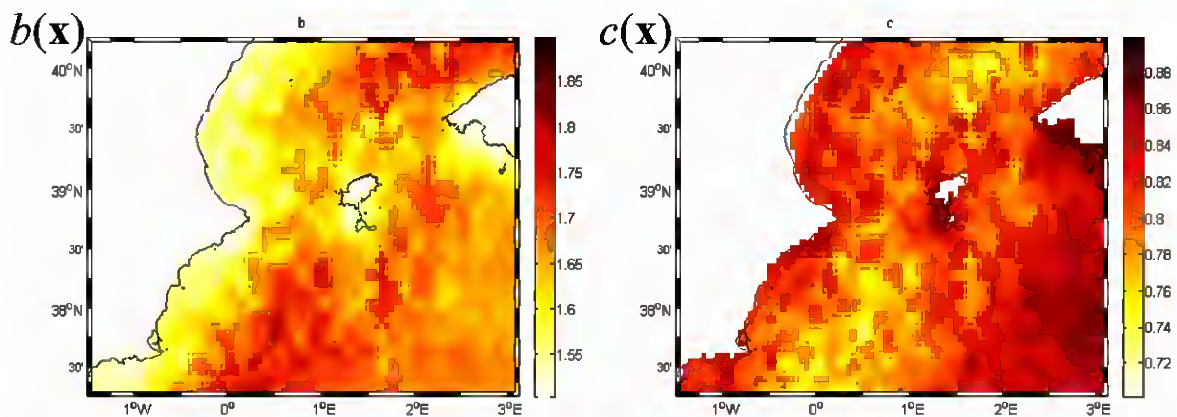


Figura 3.15. Distribución espacial de  $b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$  del ajuste a la función potencial

$$H_S, c(\mathbf{x}, t) = b(\mathbf{x})H_S(\mathbf{x}, t)^{c(\mathbf{x})} .$$





En el organigrama de la figura 3.16 se muestran los pasos seguidos en la calibración de la altura de ola significativa, siguiendo un procedimiento similar la calibración del resto de los parámetros geofísicos (periodo medio de oleaje y marea meteorológica).



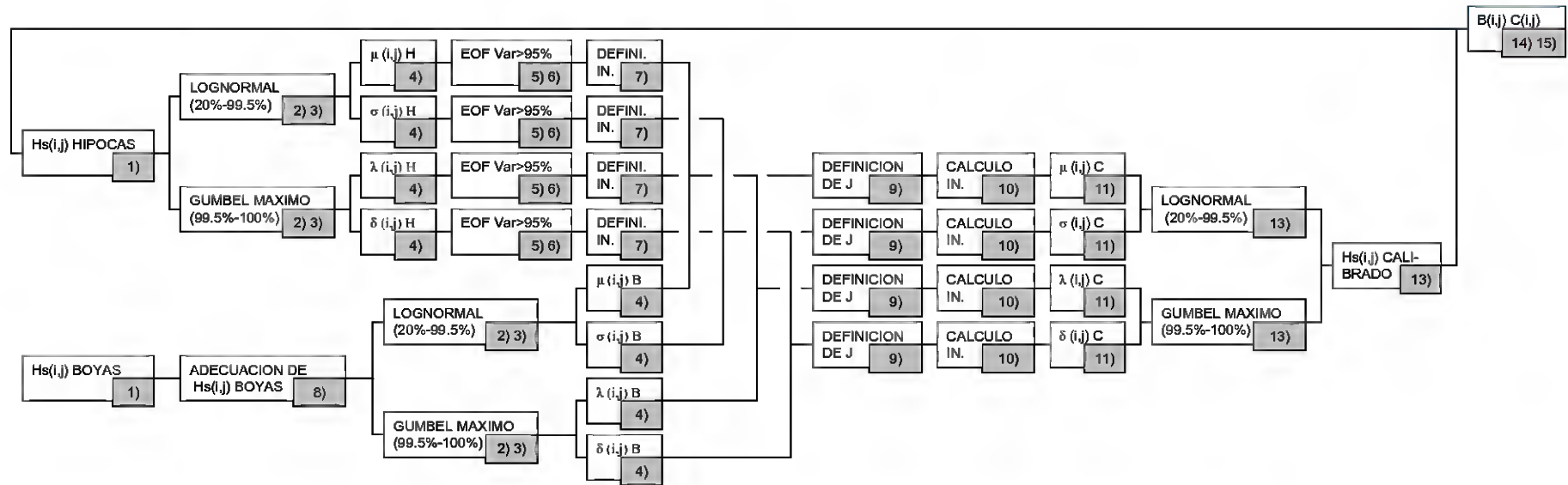


Figura 3.16. Organigrama de calibración de  $H_s$ , donde el índice  $i$  indica la posición  $x_i$  y el  $j$  el tiempo  $\tau_j$



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 4. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE  
OLEAJE, VIENTO Y MAREA METEOROLÓGICA**

---





## 4. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE OLEAJE, VIENTO Y MAREA METEOROLÓGICA

El análisis de los datos ha exigido realizar un estudio preliminar encaminado a seleccionar el grupo de variables geofísicas con el que se desea trabajar y el tipo de técnica realizado en el análisis. Una vez considerados los efectos más representativos del cambio climático en la costa, se ha considerado que el análisis debe realizarse teniendo en cuenta las siguientes magnitudes: altura de ola significativa,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , y medio,  $T_m$ , dirección del oleaje,  $\sigma$ , flujo de energía,  $\overline{F_E}$ , duración de la excedencia de altura de ola,  $D$ , marea meteorológica,  $MM$ , velocidad del viento,  $W$ , y dirección del transporte eólico,  $\overline{Q_w}$ .

Esta selección de las variables se ha realizado en función de su grado de representatividad descriptiva en el clima marítimo y de su utilidad para evaluar los efectos en la costa producidos por el cambio climático. Las variables elegidas presentan dos características geofísicas diferentes; escalares ( $H_s$ ,  $MM$  y  $W$ ) y direccionales ( $\overline{F_E}$  y  $\overline{Q_w}$ ). Según la naturaleza de estas se ha realizado una metodología para el análisis de tendencias.

En cualquier caso, es necesario hacer énfasis en el hecho de que lo que se busca son las tendencias que estos parámetros o magnitudes han ido experimentando en el pasado, con el fin de intentar identificar los posibles efectos que el cambio climático ha causado sobre los mismos.

Se ha realizado un análisis de tendencias de los regímenes medios y extremos de cada uno de los parámetros. Para cada análisis ha sido necesario desarrollar distintas metodologías, algunas de ellas novedosas en el estado del conocimiento.

### 4.1 Análisis de tendencias de valores medios

#### 4.1.1 Variables escalares

A partir de la serie horaria de datos HIPOCAS, se toma como unidad temporal el mes, con el fin de incluir la estacionalidad a lo largo del año. Esta estacionalidad considera las variaciones invierno-verano, gota fría, etc, con lo que se elimina el ruido que se genera en el estudio de tendencias para una escala de tiempo mayor. Para analizar correctamente cada variable se ha caracterizado la función de distribución óptima para cada una de ellas. Se han seleccionado las siguientes funciones:





- Altura de ola significativa,  $H_s$ :

Distribución Log Normal:

$$f(H_s; \mu, \sigma) = \frac{1}{H_s \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\ln(H_s) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Parámetros:  $\mu, \sigma$ .

- Marea Metereológica,  $MM$ :

Distribución Normal:

$$f(MM; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(MM - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Parámetros:  $\mu, \sigma$ .

- Velocidad del Viento,  $W$ :

Distribución Weibull de mínimos bi-parámetrica:

$$f(W; c, k) = \frac{c}{k} \left(\frac{W}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{W}{c}\right)^k\right]$$

Parámetros:  $c, k$ .

El análisis de tendencias en el tiempo se realiza para cada variable ajustando los parámetros de su función de distribución a la expresión:

$$[\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{sen}(kt) + \beta_2 \cos(kt) + \beta_3 \text{sen}(2kt) + \beta_4 \cos(2kt)] \cdot e^{\beta_5 t}$$

donde:  $k = 2\pi$ ,  $t$  se expresa en años, [...] describe la variación a lo largo del año y  $e^{\beta_5 t}$  la variación temporal para la serie de datos completa ( $\hat{\beta}_5$  = tasa anual de variación del parámetro a ajustar, en %/1). En la figura 4.1 se muestra la metodología aplicada y los valores de tendencia temporal obtenidos para una determinada situación:



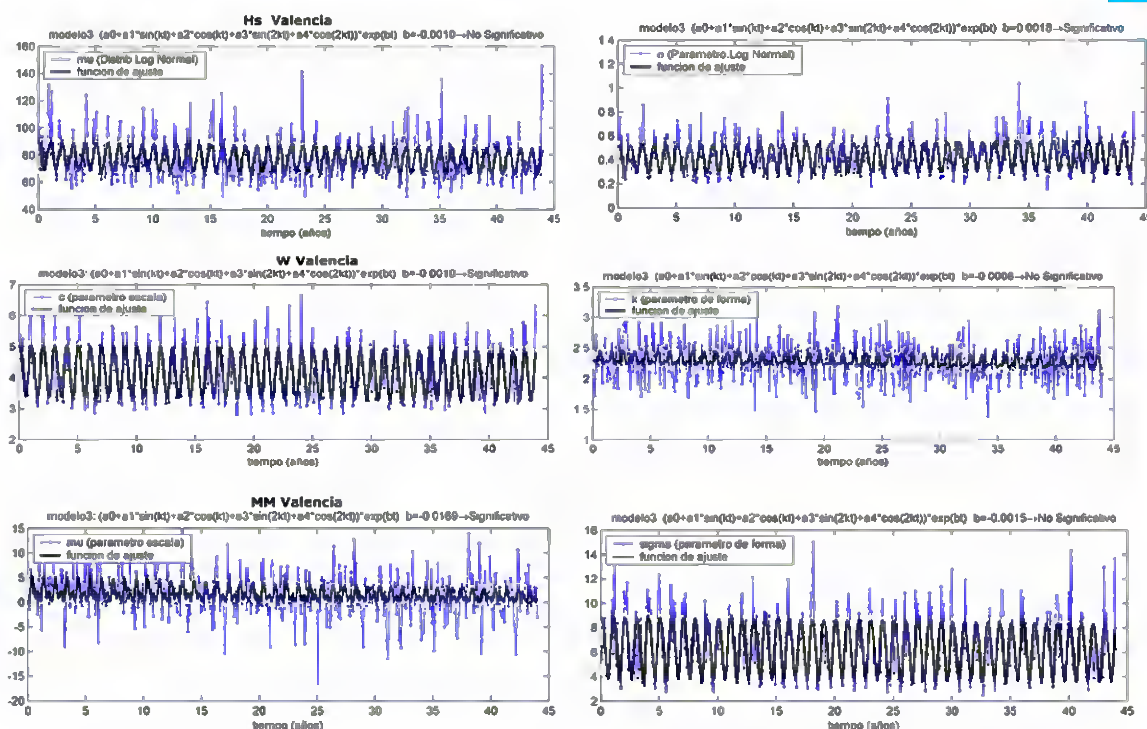


Figura 4.1. Ejemplo del ajuste del modelo propuesto para estudiar tendencias.

Una vez realizado cada ajuste se ha comprobado que el método empleado es el adecuado para el análisis (figura 4.2). Se ha confirmado que la relación entre residuos (diferencia entre la función de ajuste obtenida y el valor real para cada dato utilizado), sucesivos e interanuales no presenta ninguna correlación y comprobado que los residuos normalizados se ajustan a una normal  $N(0,1)$ .



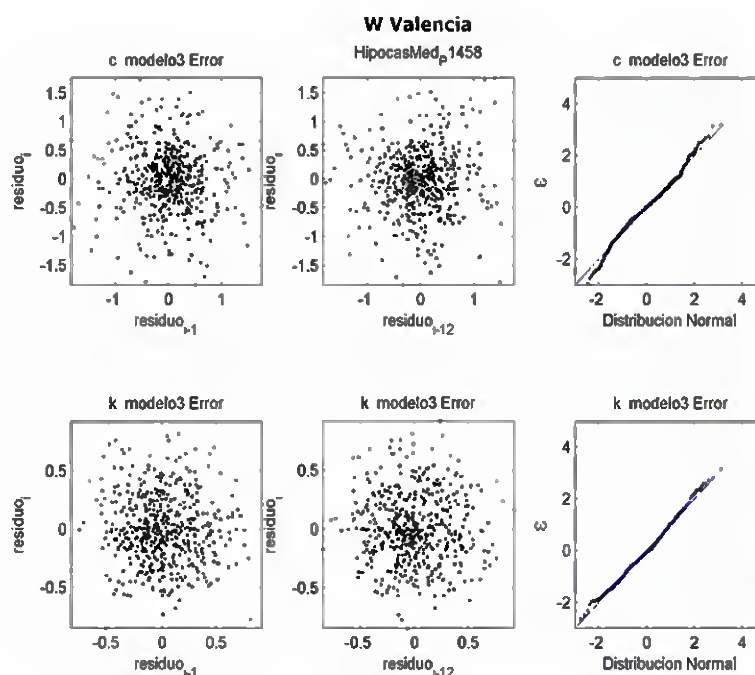


Figura 4.2. Comprobación del método empleado para los parámetros  $c$  y  $k$  de la variable  $W$  y el punto WAM 1458.

Comprobada la idoneidad del método empleado, se han calculado altura de ola media,  $\overline{H_s}$ , su variación,  $\delta\overline{H_s}$ , velocidad media del viento,  $\overline{W_s}$ , su variación,  $\delta\overline{W_s}$  y la magnitud y tendencia de la variable  $H_{s/12}$ , altura de ola significativa con probabilidad de ser superada sólo 12 horas al año. El análisis de la variación de estas variables es necesario para la evaluación de los efectos que el cambio climático puede producir en nuestras costas (realizado en la Fase II). Así,  $\overline{H_s}$  y  $H_{s/12}$ , son valores muy utilizados en ingeniería de costas, que aportarán información sobre los efectos que puede causar un cambio de estas magnitudes en las playas y en el análisis funcional del diseño de estructuras marítimas.  $\overline{W_s}$  aporta información sobre el transporte eólico del sedimento en las playas y zonas de dunas. La determinación de los valores medios de altura de ola y viento y su variación se ha calculando integrando los parámetros indicadores del valor promedio de las distribuciones correspondientes. El valor promedio para la distribución log-normal (oleaje) es:

$$x_i(t) = \exp\left(\frac{\mu_t + \sigma_t^2}{2}\right) \text{ y para la distribución de Weibull de mínimos es:}$$

$$x_i(t) = c_i \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_i}\right). \text{ El valor promedio resultante es: } \overline{x_i} = \int_{j-1}^j x_i(t) dt. \text{ El valor de cambio a}$$

lo largo del tiempo se ha calculado mediante la expresión:





$$\overline{\delta x_i} = \frac{\int_{43}^{44} x_i(t) dt - \int_0^1 x_i(t) dt}{\int_0^{44} dt} .$$

Esta aproximación es válida ya que la magnitud de cambio resultante en el parámetro  $\beta_5$  es suficientemente pequeño para aproximar:  $e^{\beta_5 \cdot t} \cong 1 + \beta_5 \cdot t$ .

La estimación del valor  $H_{s/2}$ , se deduce directamente calculando en la función de ajuste log-normal resultante para cada punto, la altura de ola correspondiente a su probabilidad asociada (prob.=1-12/8760=0.9986). Para estimar la tendencia que sigue en el tiempo se ha calculado la variación media que resulta en la serie de 44 años analizada.

#### **4.1.2 Variables direccionales**

El análisis de tendencias de las variables direccionales aporta aspectos esenciales para evaluar el efecto del cambio climático. Así, el flujo medio de energía del oleaje influye directamente sobre la forma en planta de la playa, o la dirección e intensidad del viento definen el transporte sedimentario de los sistemas dunares. Las variables direccionales seleccionadas son, el flujo medio de energía del oleaje y el transporte eólico, a partir de la serie horaria de HIPOCAS de altura de ola,  $H_s$ , dirección del oleaje,  $\theta_H$ , velocidad del viento,  $W$  y dirección del viento,  $\theta_W$ :

$$\overline{F_E} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \overline{c_g} = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g (\cos \theta_H \vec{i} + \sin \theta_H \vec{j})$$

$$\overline{Q_W} = \alpha W^3 (\cos \theta_W \vec{i} + \sin \theta_W \vec{j})$$

Se han analizado y clasificado las variables en función de sus principales direcciones, obteniéndose una caracterización de las “familias” de direcciones predominantes, en función del flujo de energía acumulado. Se ha observado una mayor variedad en la costa mediterránea (hasta 4 familias de oleaje). Obsérvese en la figura 4.3 para la costa catalana las distintas familias de oleaje (el tamaño del vector hace referencia a la proporción de energía de ese sector).



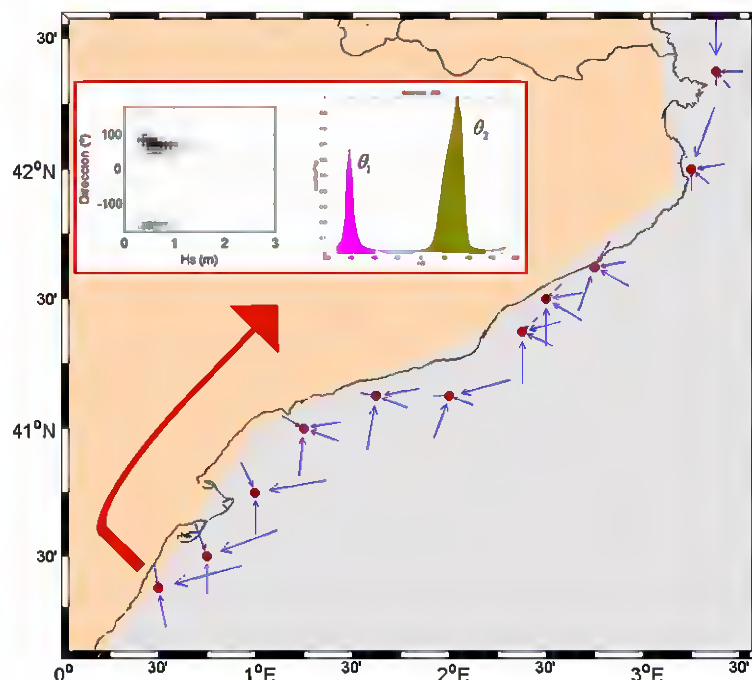


Figura 4.3. Determinación de las familias de direcciones predominantes.

Tras esta caracterización se ha realizado, para cada familia de direcciones, el ajuste lineal de la serie de 44 años, de la variación de la dirección media anual y del porcentaje de energía (ver ejemplo en la figura 4.4).

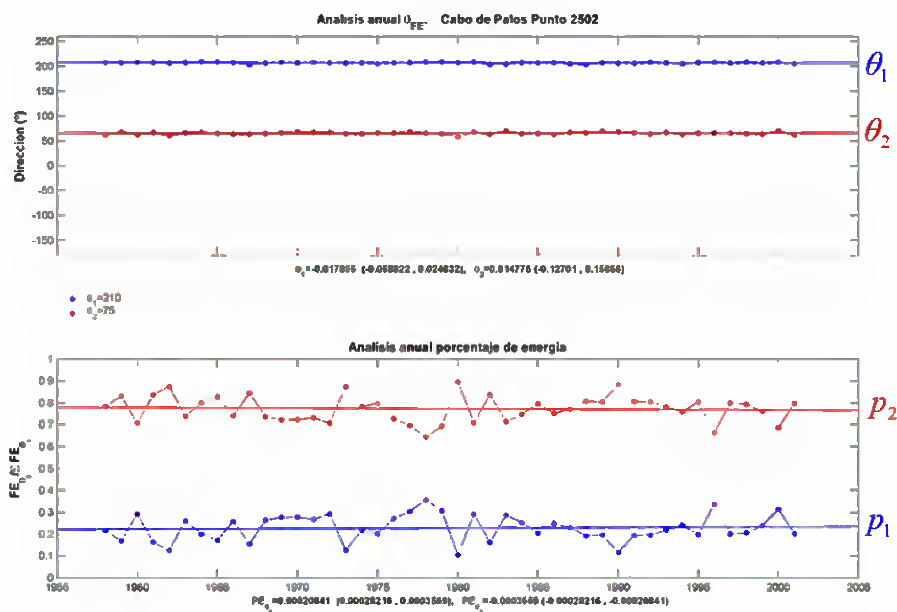


Figura 4.4. Análisis de tendencias de cada familia de direcciones.





A partir de estos datos se ha estimado el ángulo medio de dirección de la variable para cada año:

$$\theta = \arctan \left( \frac{\sum_{i=1}^n p_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n p_i \cos \theta_i} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} p_i = \text{porcentaje de energía de cada familia.} \\ \theta_i = \text{dirección representativa de cada familia.} \end{array} \right.$$

Por último, se ha realizado un ajuste del ángulo medio de dirección para toda la serie temporal a estudiar, de donde se obtiene el valor de la tasa media de variación anual de la dirección (°/año). Además, se ha estudiado el comportamiento general de las variables seleccionadas estimando el ángulo medio, máximo y mínimo (ver ejemplo en la figura 4.5).

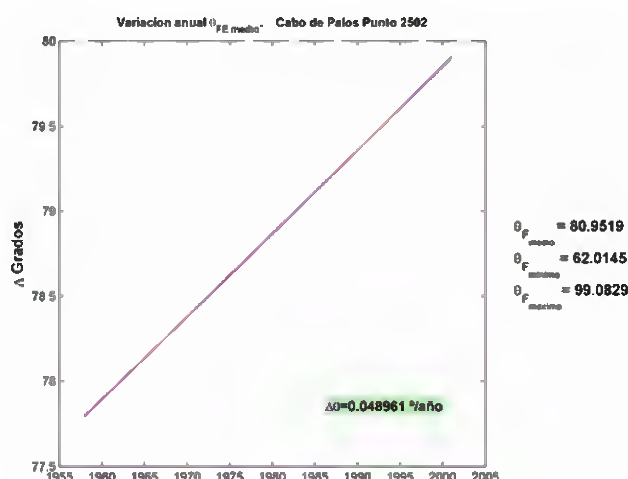


Figura 4.5. Ejemplo de análisis de tendencia de la dirección del oleaje.

## 4.2 Análisis de tendencias de duraciones de excedencia

Uno de los factores de los que depende el diseño de una estructura marítima es de las condiciones de trabajo (operatividad). Ésta viene descrita en la R.O.M (Recomendaciones de Obras Marítimas), como dependiente de tres indicadores: la operatividad mínima, el número medio de paradas técnicas admisibles y la duración máxima de la parada técnica. Dada su implicación en la operatividad de un puerto, se ha decidido realizar un análisis de tendencias de duraciones de excedencia para las siguientes variables oceanográficas: altura







de ola significativa,  $H_s$ , y velocidad del Viento,  $U_{10}=W$ , estudiando, para cada una de ellas, los siguientes factores:

1. Duración media anual,  $\bar{D}$
2. N° eventos por año,  $N$
3. Duración máxima más probable en el año,  $D_{\max}$

La unidad de tiempo de estudio fijada es anual y la excedencia de las series temporales analizadas se ha tomado a partir de un umbral de corte que representa el 2 % de los datos superiores de cada serie. Para estimar los datos de estudio se ha calculado la función de densidad,  $f(D/x_i)$ , de las duraciones, en horas, condicionadas a la variable oceanográfica  $x_i$  ( $H_s$  o  $W$ ) superior al umbral de corte, y su función de distribución correspondiente,  $F(D/x_i)$ . Se ha obtenido como función de distribución óptima la Weibull de mínimos bi-paramétrica.

A partir de la definición de estas funciones se puede estimar su duración media:

$$\bar{D}(x_i) = \int_0^{\infty} \tau f_D(\tau | x_i) d\tau \quad \text{y el número de eventos al año: } N(x_i) = \frac{[1 - F_{x_i}(x_i)]T}{\bar{D}(x_i)} \quad \text{donde}$$

$T=8766$  horas. Considerando la función de máximos para  $N$  eventos independientes se obtiene la distribución de la duración máxima anual y el estadístico de la duración máxima más probable al año (figura 4.6):

$$F_{D,\max}(D | x_i) = F_D(D | x_i)^{N(x_i)}$$

$$f_{D,\max}(D | x_i) = N(x_i) F_D(D | x_i)^{N(x_i)-1} f_D(D | x_i)$$





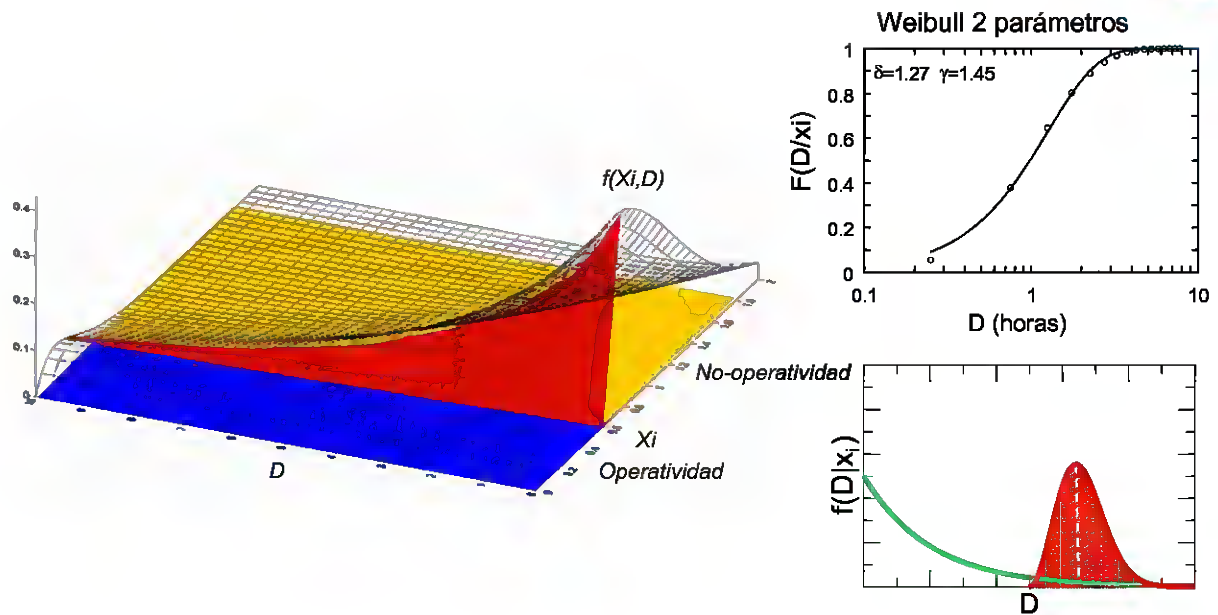


Figura 4.6. Metodología para la obtención de la duración máxima más probable al año.

A partir de las series temporales de los factores a estudiar se ha realizado, para cada serie, el ajuste lineal de los datos por el método de mínimos cuadrados, obteniéndose así, la tasa de variación de cada factor al año y la significancia del ajuste (mediante el cálculo del intervalo de confianza del 95%), ver figura 4.7.

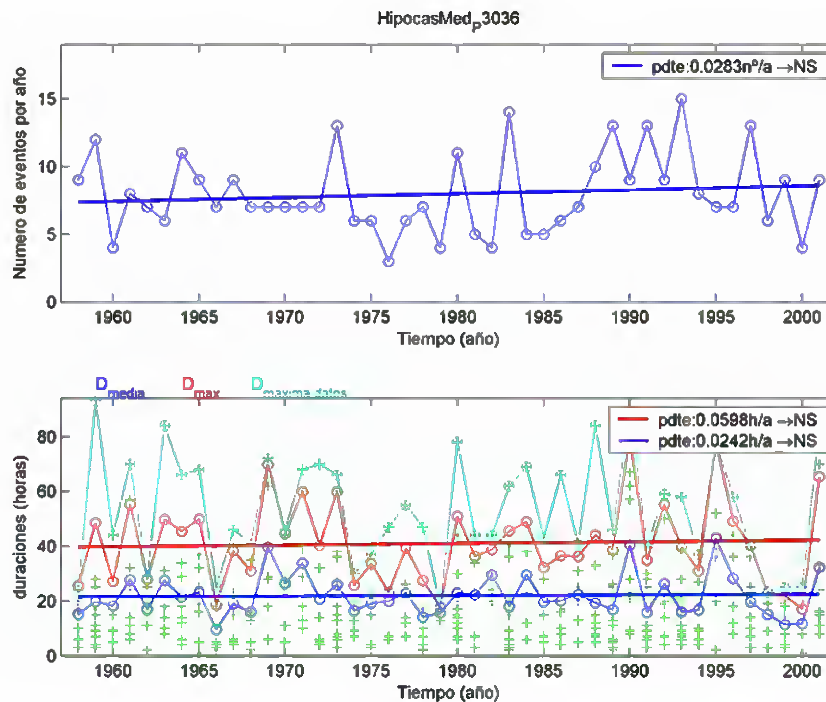


Figura 4.7. Ejemplo de resultados, para  $H_s$ , en el análisis de excedencias de duraciones.





### 4.3 Análisis de tendencias de valores extremos.

#### 4.3.1 Introducción

El régimen extremal de una variable es aquel que describe la función de distribución de los valores extremos de dicha variable. El régimen extremal de una variable geofísica oceanográfica de una determinada zona es un factor limitante en la biología y geomorfología de su costa. Además, determina el uso del litoral por el hombre. Así, como se describe en la ROM 0.0 (Recomendaciones para Obras Marítimas), las obras marítimas deben satisfacer unas determinados requerimientos de fiabilidad, dependientes de la definición de régimen extremal de clima marítimo a pie de obra.

Para el análisis de tendencias del régimen extremal se han seleccionado las siguientes variables geofísicas: altura de ola significante,  $H_s$ , marea meteorológica,  $MM$  y velocidad del Viento,  $U_{10}=W$ .

La caracterización de los valores extremos se ha realizado a partir de la definición de un umbral de corte. La serie de estudio que se obtiene,  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , se corresponde con los datos superiores al valor del umbral definido, figura 4.8.

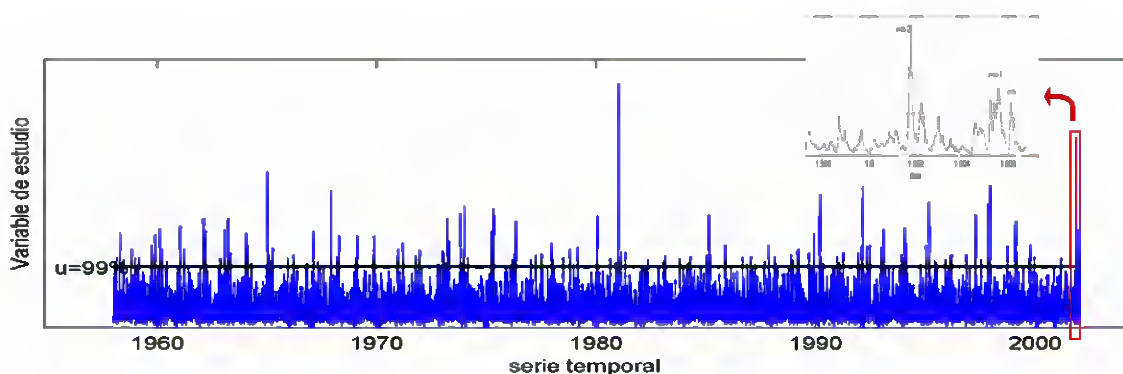


Figura 4.8. Selección de los valores extremos a partir de un umbral de corte.

A partir de esta serie de datos se han determinado para las variables geofísicas seleccionadas:

$$\text{Número de Eventos} = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$$

$$Y_{max}(x_{max-u}) = \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n\}, \text{ como el valor máximo de cada evento extremal.}$$





$Duración = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_{n_j}\}$ , en horas.

$Instantes = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{n_j}\}$ , con escala temporal anual, para la serie de HIPOCAS completa, en el punto que se está analizando.

Para el estudio de tendencias de los valores extremos se ha realizado un análisis estadístico preliminar de los datos (figura 4.9) con el fin de detectar el comportamiento general de las variables mediante el estudio de procesos como:

- Grado de variación de la frecuencia e intensidad medias de los datos para la serie temporal caracterizada por los temporales.
- Presencia y grado de importancia de procesos naturales interanuales.
- La estacionalidad a lo largo del año en las series de datos. Se ha detectado una estacionalidad muy marcada en los eventos de temporales con periodos de calma importantes en la época estival y máximos en invierno.
- Comportamiento general de la media y varianza de la variación de temporales.

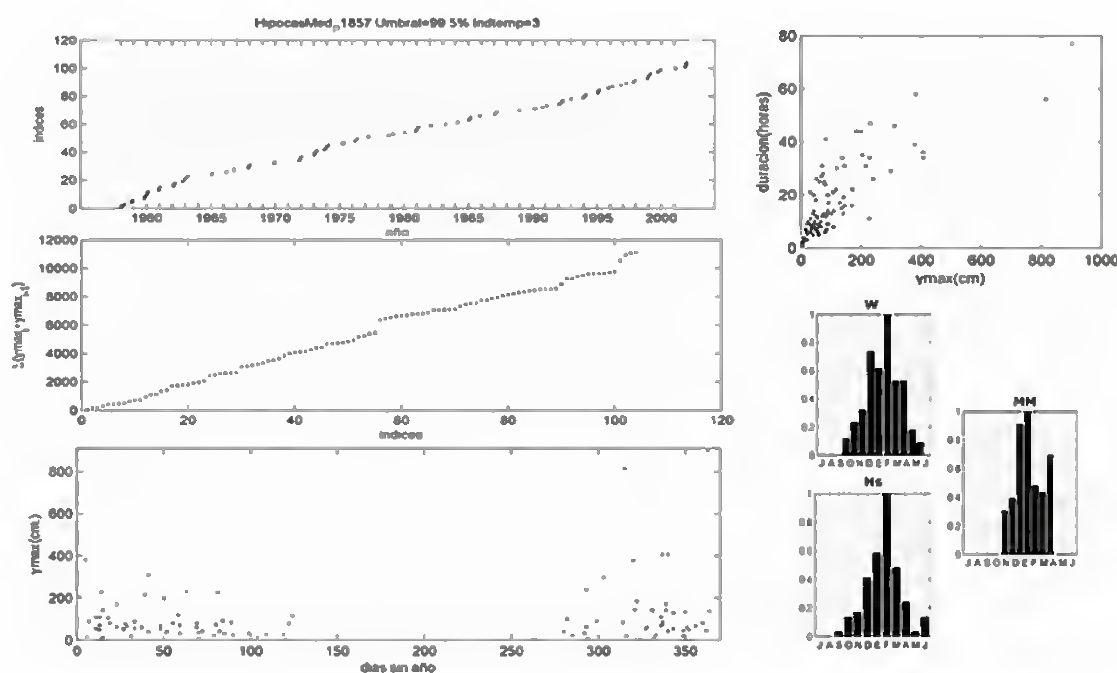


Figura 4.9. Ejemplo de estudio estadístico preliminar de los datos.

De esta manera se ha determinado el umbral de corte óptimo para el análisis de los datos (datos superiores al percentil del 99.5 %) y la independencia de tiempo entre temporales





que se debe considerar (72 horas de duración para que los eventos pertenezcan a sucesos meteorológicamente independientes).

Para analizar la influencia del cambio climático en el régimen extremal se ha considerado necesario realizar el análisis de tendencias para dos aspectos: la frecuencia de sucesos y la intensidad de los valores extremos. En ambos casos se plantean modelos que dependen de un determinado número de parámetros (entre 5 y 8). El procedimiento para obtener los estimadores de los parámetros se basa en el método de máxima verosimilitud.

### 4.3.2 Modelos de variación de la frecuencia de eventos extremales

Después de estudiar el análisis estadístico preliminar se ha observado una variación estacional en el comportamiento de la frecuencia de sucesos. La tasa de ocurrencia de sucesos por unidad de tiempo se puede describir como la función:

$$v(t) = [\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{sen}(kt) + \beta_2 \cos(kt) + \beta_3 \text{sen}(2kt) + \beta_4 \cos(2kt)] \cdot e^{\beta_5 t}$$

donde  $k = 2\pi$ ,  $t$  en años y  $v(t) = 0$  para valores negativos de la función.

Este modelo representa la estacionalidad a lo largo del año más la posible tendencia de variación temporal a largo plazo. Si se considera la probabilidad de que ocurra un evento extremal en el tiempo como una variable aleatoria, que representa el tiempo entre sucesos de Poisson, se puede definir la función exponencial de distribución para un instante  $t_i$  condicionado al instante  $t_{i-1}$  y su función de densidad asociada:

$$F(t_i / t_{i-1}) = 1 - \exp\left[-\int_{t_{i-1}}^{t_i} v(t) dt\right]$$

$$f(t_i / t_{i-1}) = [1 - F(t_i / t_{i-1})] \cdot v(t)$$

Para obtener el valor de tendencia ( $\hat{\beta}_5$ ) a partir del modelo propuesto, se ha realizado un ajuste del modelo mediante el método de máxima verosimilitud. Se ha definido la función de verosimilitud como el logaritmo de la función de distribución conjunta:

$$L = f(t_1 / t_0) \cdot f(t_2 / t_1) \cdot \dots \cdot f(t_{n-1} / t_{n-2}) \cdot f(t_n / t_{n-1})$$

$$l = \log L = \sum_{i=1}^n \log[f(t_i / t_{i-1})]$$





A partir de la maximización de  $l$  se obtienen los estimadores  $\hat{\beta}_i$  y se calcula el intervalo de confianza del estimador de la tendencia ( $\hat{\beta}_5$ ) a partir del “likelihood-profile”, ver ejemplo en la figura 4.10.

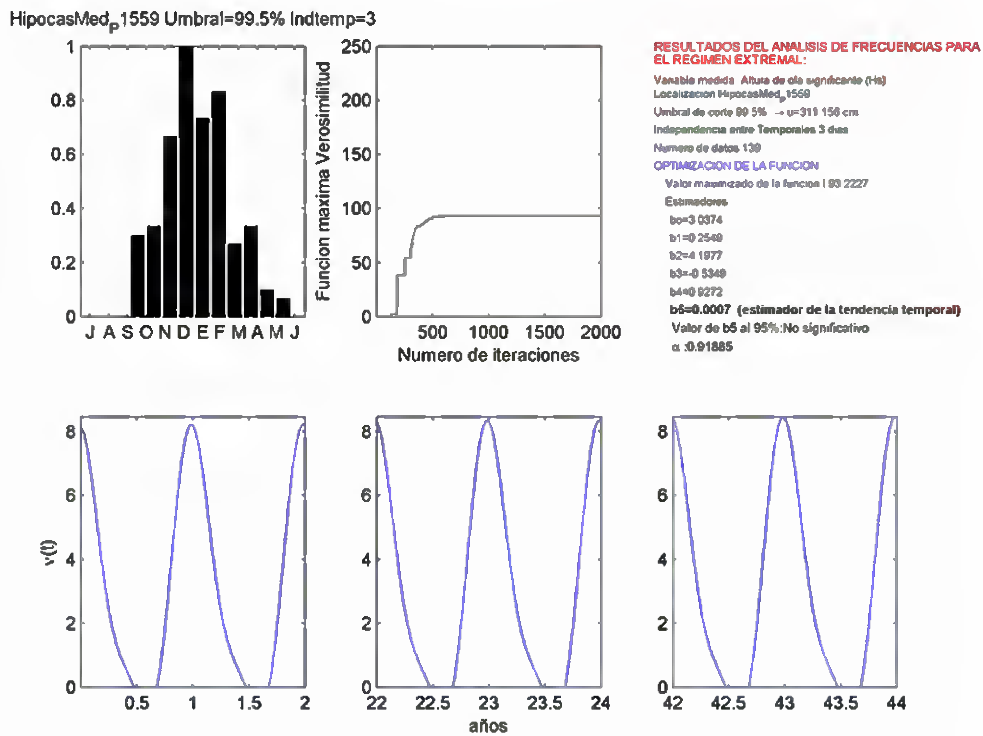


Figura 4.10. Ejemplo del modelo de variación de la frecuencia de eventos extremales.

Posteriormente se ha realizado un diagnóstico del ajuste del método mediante el cálculo del estadístico  $Z$  (Smith, 2003) y su representación en papel probabilístico (ver figura 4.11).

$$Z = \int_{t_{i-1}}^{t_i} v(t) dt$$



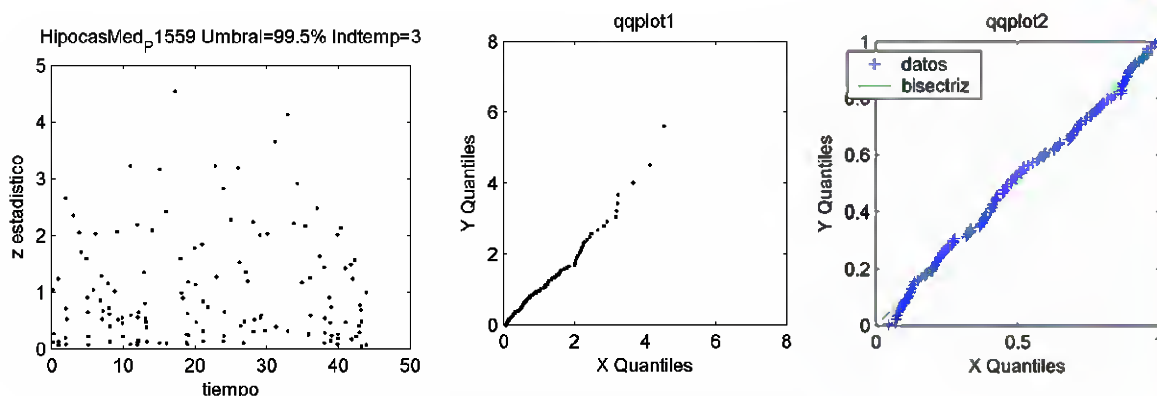


Figura 4.11. Comprobación del modelo de variación de la frecuencia de eventos extremales.

El diagnóstico del ajuste de modelo es tanto mejor en cuanto los sucesos medidos y el modelo, representado en el papel probabilístico y en dibujo de cuantiles, se acercan a la bisectriz. Los resultados obtenidos indican que prácticamente en todos los casos analizados se ha observado una buena resolución.

### 4.3.3 Modelos de variación de la intensidad de eventos extremales.

Con el fin de estudiar con la mayor fiabilidad posible las tendencias a largo plazo de intensidades de eventos extremales se ha definido un modelo que considera para el análisis de la serie temporal de los datos no sólo la magnitud de los sucesos, sino también su ocurrencia en un determinado instante. De esta manera se trabaja con una serie de datos bidimensional:  $Y_i(x_{max-u}, t_i) = \{y_1, t_1, y_2, t_2, \dots, y_n, t_n\}$ .

Es importante señalar que, aunque inicialmente en el primer informe de seguimiento (Noviembre 2003), se consideró el método de Vikebo et al. (2003) y en el segundo (Junio 2004) el modelo de Poisson-GPD (modelo combinado de Poisson y distribución generalizada de Pareto), según la metodología descrita en Smith (2003), en estos últimos meses se ha mejorado la metodología propuesta anteriormente con lo que se ha considerado oportuno plasmar los actuales resultados.

Para la caracterización de las intensidades se ha utilizado la distribución generalizada de Pareto, dada su gran representatividad ante procesos cuyos valores extremos tienen una cola larga en su función de distribución:

Su función de distribución es: 
$$G(y_i; \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{y_i}{\sigma}\right)_+^{-1/\xi}$$





Y función de densidad:  $g(y_i; \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \cdot \left(1 + \frac{\xi}{\sigma} \cdot y_i\right)_+^{-1 + \frac{1}{\xi}}$

donde:  $(x)_+ = x$ , si:  $x > 0$  y  $(x)_+ = 0$ , si:  $x \leq 0$ .

Para representar la tasa de ocurrencia de sucesos,  $\lambda(t)$ , a la hora de calcular la tendencia de las intensidades, se ha considerado, al igual que en el modelo de frecuencias, los instantes generados representados mediante la variable de Poisson:

$$f(t_i / t_{i-1}) = \lambda(t) \cdot \exp^{-\int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt}$$

Al igual que en el método de frecuencias el ajuste del modelo se ha realizado mediante el método de máxima verosimilitud. Para ello se ha considerado una función a maximizar combinada, formada por dos partes: una correspondiente a la componente de Poisson (frecuencias) y otra a la distribución de Pareto (intensidades):

$$L(Y_i; y_i, t_i) = L_{frec} \cdot L_{int}$$

Aplicando logaritmos resulta:

$$l(Y_i; y_i, t_i) = \log(L) = l_{frec} + l_{int}$$

donde:

$$\begin{cases} l_{frec} = \sum_{i=1}^n \log[f(t_i / t_{i-1})] \\ l_{int} = -\sum_{i=1}^n \log \sigma_i - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \cdot \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \frac{\xi}{\sigma_i} \cdot y_i\right) \end{cases}$$

Con el fin de relacionar las intensidades con su variación en el tiempo se ha recurrido a las expresiones obtenidas en el modelo de Poisson-GPD (modelo combinado de Poisson y distribución generalizada de Pareto), cuya metodología ha sido descrita por Smith (2003). Este modelo liga la distribución de Pareto, para excedencias sobre un umbral, con la teoría clásica de valores extremos a partir de máximos anuales, caracterizada a partir de la función generalizada de extremos:

$$H(x; \mu, \psi, \xi) = \exp \left\{ - \left( 1 + \xi \frac{x - \mu}{\psi} \right)_+^{-1/\xi} \right\}$$







Obteniéndose la relación entre parámetros:

$$\begin{cases} \sigma = \psi + \xi(u - \mu) \\ \lambda = \left(1 + \xi \frac{u - \mu}{\psi}\right)^{-1/\xi} \end{cases},$$

donde  $u = \text{umbral seleccionado}$  y  $\lambda = \lambda(t)$ : *tasa de ocurrencia entre sucesos*.

Se ha considerado que el parámetro  $\mu$  varía en el tiempo mediante la expresión:

$$\mu = \mu(t) = [b_0 + b_1 \cdot \text{sen}(kt) + b_2 \cos(kt) + b_3 \text{sen}(2kt) + b_4 \cos(2kt)] \cdot e^{\mu t}$$

El parámetro  $\psi$ , que representa la dispersión de la distribución se ha considerado proporcional al parámetro de localización  $\mu(t)$ , y por tanto también varía en el tiempo:

$$\psi = \psi(t) = \alpha_\psi \cdot \mu(t)$$

Para el caso del parámetro de forma,  $\xi$ , se asume que no varía en el tiempo. El parámetro  $\xi$  indica a qué distribución tipo de máximos se ajustan los datos, de forma que si se obtiene:  $\hat{\xi} > 0$  la distribución de ajuste óptima es Fréchet, si  $\hat{\xi} \approx 0$  la distribución óptima es Gumbel y si  $\hat{\xi} < 0$  la distribución es de Weibull de máximos. Los resultados indican que la altura de ola se ajusta mayoritariamente a una distribución Gumbel en el Mediterráneo, aunque en la costa atlántica hay que destacar ajuste a Weibull de máximos para algunos puntos. La marea meteorológica y la velocidad del viento se caracterizan por la distribución de de Gumbel y de Weibull.

De esta manera se ha realizado la maximización de  $l(Y_i; \beta_i, \alpha_\psi, \xi)$ , que permite obtener los estimadores:  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4, \hat{\beta}_5, \hat{\alpha}_\psi, \hat{\xi}$ , y determinar los intervalos de confianza mediante el método *Likelihood Profile* para el parámetro de tendencia de largo plazo,  $\hat{\beta}_5$ . En la figura 4.12 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para los parámetros dependientes del tiempo del modelo de ajuste:





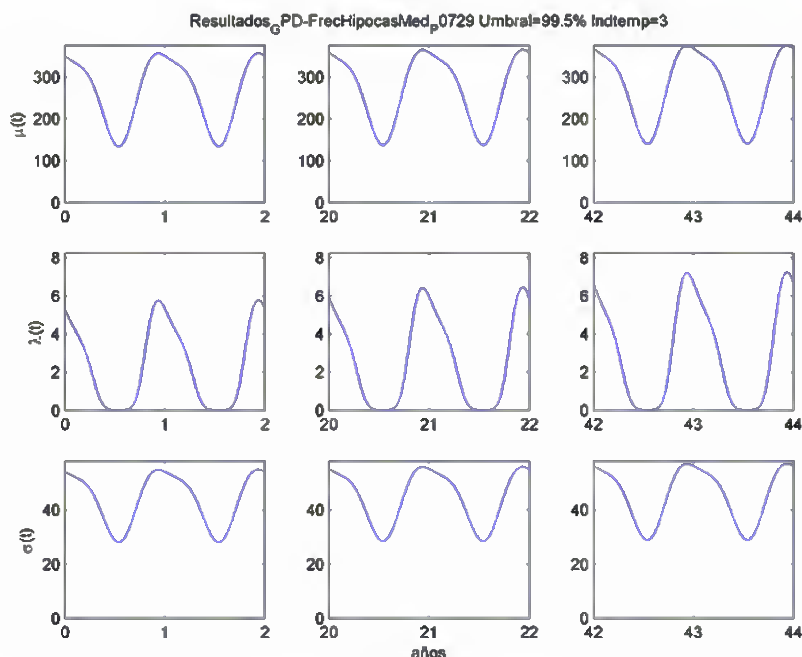


Figura 4.12. Resultados del modelo de análisis de intensidades para  $H_s$  de un punto de HIPOCAS.

En la figura 4.12 se observa la estacionalidad a lo largo del año (valores máximos en diciembre y mínimos en junio para  $\mu(t)$ ). Nótese también como la tasa de ocurrencia de sucesos por unidad de tiempo,  $\lambda(t)$ , es nula en el periodo mayo-agosto. Finalmente, obsérvese la tendencia de variación a largo plazo (en este caso aumentan las variables a lo largo de 44 años).

Posteriormente se ha realizado una comprobación del ajuste del método mediante el cálculo del *estadístico Z* y del *estadístico W* y su diagnóstico en papel probabilístico (ver figura 4.13), comprobándose de nuevo, para prácticamente todos los casos analizados, la idoneidad del método propuesto.

$$W = \frac{1}{\xi_{T_k}} \log \left\{ 1 + \frac{\xi_{T_k} Y_k}{\psi_{T_k} + \xi_{T_k} (u - \mu_{T_k})} \right\}$$



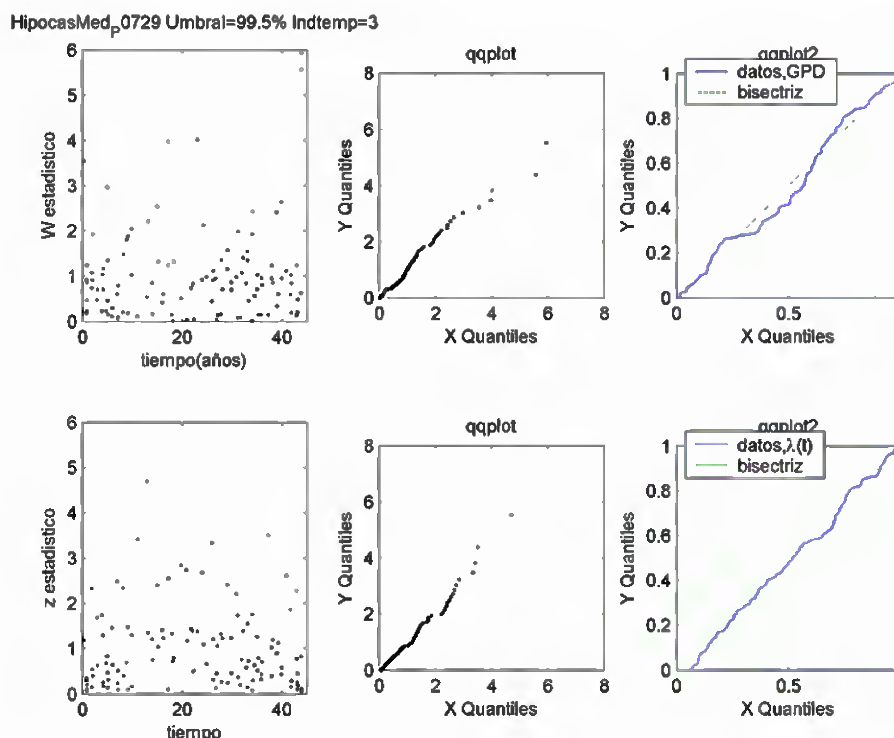


Figura 4.13. Comprobación del modelo de variación de la Intensidad de eventos extremales.

Se ha estimado, a partir de los análisis realizados, los valores de altura de ola, marea meteorológica y velocidad del viento asociados a un Periodo de Retorno determinado. El Periodo de Retorno es una medida de la probabilidad de que un evento, de una determinada magnitud, sea igualado o excedido por lo menos una vez. El cálculo de la magnitud de las variables de estudio asociada a un periodo de retorno y la estimación de su variación a largo plazo aportan una gran información para describir los efectos que el cambio climático de eventos extremales pueda provocar en el litoral español. Se ha decidido calcular el Periodo de Retorno de 50 años para las variables analizadas ya que este periodo presenta una escala acorde con la importancia y repercusión social, ecológica y económica a analizar, además de presentar una magnitud estadísticamente aceptable con el intervalo de 44 años analizado.

Dado que los estimadores obtenidos en el cálculo de tendencias de intensidades de los valores extremos se han expresado en función de la distribución generalizada de máximos anuales, se han calculado las magnitudes de periodo de ocurrencia de 50 años a partir de su probabilidad asociada en la función de distribución correspondiente.

$$\exp \left\{ - \left( 1 + \frac{\hat{\xi} \cdot y_n - \mu_t}{\psi_t} \right)_+^{-1/\xi} \right\} = 1 - \frac{1}{n} ,$$

donde:  $y_n =$  variable asociada a un periodo de retorno de  $n$  años,





que considerando la aproximación:  $1 - \frac{1}{n} \approx \exp\left(-\frac{1}{n}\right)$  resulta:

$$y_n(t) = \mu_t + \psi_t \frac{n^{\hat{\xi}} - 1}{\hat{\xi}},$$

que, considerando las variaciones temporales fijadas para los parámetros  $\mu(t)$  y  $\psi(t)$ , permite calcular la variable de retorno media como:

$$\bar{y}_n = \left[ 1 + \hat{\alpha}_\psi \cdot \frac{n^{\hat{\xi}} - 1}{\hat{\xi}} \right] \cdot \frac{\int_0^{44} \mu(t) dt}{\int_0^{44} dt}$$

La variación en el tiempo de  $y_n$  se ha calculado mediante la expresión:

$$\delta y_n = \frac{\int_0^{44} \mu(t) dt - \int_0^1 \mu(t) dt}{\int_0^{44} dt} \left[ 1 + \hat{\alpha}_\psi \cdot \frac{n^{\hat{\xi}} - 1}{\hat{\xi}} \right].$$

Para el caso de las islas Canarias, al no estar cubiertas por la malla del modelo HAMSOM, del que resultan las series de marea meteorológica estudiadas, se ha realizado un estudio de las bases de datos obtenidas de los mareógrafos de Tenerife y Las Palmas. De estos mareógrafos solo se dispone de series de 10 años (1992-2001), lo que ha impedido determinar la variación a largo plazo por falta de registro histórico de los datos. La distribución que mejor caracteriza los valores extremos de las series de los mareógrafos ha resultado ser la función generalizada de extremos, sin variaciones estacionales en los parámetros de ajuste. Para el cálculo de  $MM_{T=50 \text{ años}}$  se ha utilizado la misma expresión que para las series de HIPOCAS.

#### **4.3.4 Cálculo de las bandas de confianza del estimador de la tendencia**

Se ha calculado, a través del análisis estadístico, denominado “likelihood profile”, el intervalo de confianza del 95% para el estimador indicativo de la tendencia en el tiempo. El método likelihood profile se basa en la siguiente relación para estimar el intervalo de confianza de probabilidad  $100-x\%$ , fijando el valor de  $p$  parámetros del modelo:

$$\ell n L - \ell n L_{MLE} = 0.5 \chi^2(p, x/100)$$

donde  $L$  es la función maximizada mediante el método de máxima verosimilitud,  $L_{MLE}$  es la función maximizada fijando un determinado número de parámetros,  $p$ , y  $\chi^2$  es la función





estadística Chi-cuadrado. Para un parámetro ( $p=1$ ) y para un intervalo de confianza del 95% resulta:  $\frac{1}{2} \chi^2(1, 0.05) = 1.9207$ .

Como se observa en la figura 4.14, el valor óptimo obtenido para el parámetro estimador de la tendencia,  $\beta_5$ , sería aquel  $k$  cuyo  $\ln L - \ln L_{MLE} = 0$ . Cuanto mayor sea el valor de  $\ln L - \ln L_{MLE}$  peor será el ajuste obtenido para el  $\beta_5$  fijado. Cuanto mayor sea la curtosis de la función resultante más estrecho será el intervalo de confianza obtenido.

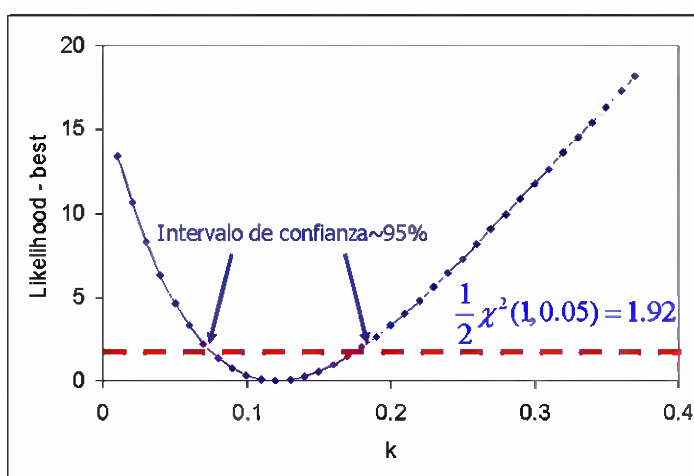


Figura 4.14. Esquema de cálculo de IC95% para un parámetro de ajuste de un modelo.

El parámetro a estudiar en este caso es el indicador de tendencia a largo plazo,  $\beta_5$  (cambio climático). Posteriormente se define un intervalo discretizado para el valor  $\beta_5$ , óptimo obtenido:  $[\beta_5 - a, \dots, \beta_5, \dots, \beta_5 + a]$ . Se realiza la maximización para cada valor del intervalo y se compara el valor de la función de verosimilitud con el valor óptimo anteriormente calculado:  $\ln L - \ln L_{MLE}$ . Una vez obtenida la función resultante se calculan los puntos de corte de ésta con la abscisa 1.9207. Los valores resultantes serán los límites del intervalo de confianza analizado (ver figura 4.14).

También se ha estimado la significancia del estimador obtenido:  $\hat{\beta}_5$ . La significancia de este estimador se calcula maximizando  $\ln L_{MLE}$  para  $\hat{\beta}_5 = 0$ . Si la diferencia entre  $\ln L - \ln L_{MLE}$  es menor que 1.9207 indica que menos del 95% de los datos son fiables, con lo que el resultado del  $\beta_5$  óptimo no será significativo.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 5. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN  
DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y DE LA MAREA ASTRONÓMICA**

---



## 5. TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR Y DE LA MAREA ASTRONÓMICA

### 5.1. Introducción

El estudio de variación del nivel del mar se ha abordado analizando la información existente en la costa española y complementando el análisis con series de mayor duración disponibles en otros puntos, como Newlyn, que por su proximidad espacial se ha considerado que pueden aportar información de interés al estudio en el litoral español.

Las series de datos utilizadas proceden de diversas fuentes, combinando información proporcionada por Puertos del Estado, el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA), el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y el sistema internacional GLOSS (The Global Sea Level Observing System).

El programa REDMAR de Puertos del Estado, en funcionamiento desde 1992, incluye medidas en Barcelona, Bilbao, Bonanza, Coruña, Gijón, Mazagón, Vigía, Málaga, Santander, Palmas, Sevilla, Tenerife, Valencia, Vigo y Villagarcía (figura 5.1). El período de medición está comprendido entre 1992 y 2001, variando la longitud del registro en función de la localidad.



Figura 5.1. Red de mareógrafos de REDMAR (Puertos del Estado)





Las series de mayor duración se han obtenido del programa GLOSS, que en el ámbito mundial coordina 290 estaciones de medida del nivel del mar (ver figura 5.2). El principal objetivo es el seguimiento y el análisis de tendencias en la variación del nivel del mar. Como parte integrante de GLOSS, existe un comité de seguimiento de nivel del mar, PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), que desde 1933 ha recogido, publicado, analizado e interpretados los datos existentes.

La base de datos de GLOSS está disponible en internet y se puede acceder a ella a través de

<http://www.pol.ac.uk/psmsl/>

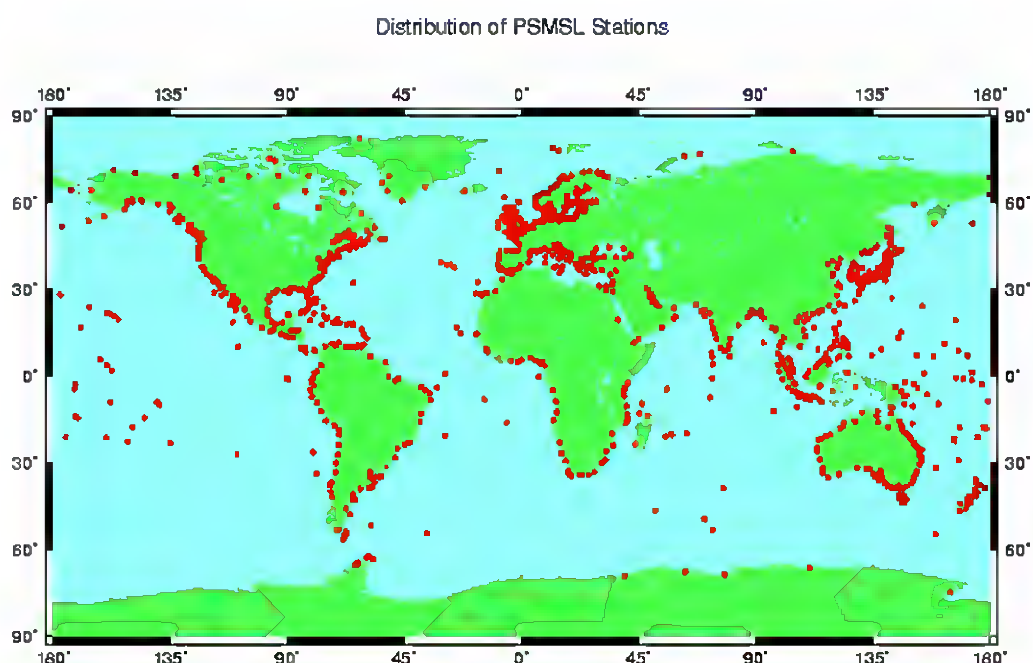


Figura 5.2. Distribución de mareógrafos integrados en la red de GLOSS.

El trabajo se ha desglosado en el análisis de tendencias del nivel medio y de la marea astronómica, considerando ambos factores influyentes en el estudio de variación del nivel del mar.

## 5.2 Análisis del nivel medio

La tabla 5.1 presenta la variación del nivel medio en el litoral español calculado por el PSMSL en Febrero del 2001. Las columnas indican, de izquierda a derecha, el código de la estación y del país, número de años utilizados en el cálculo de la tendencia, intervalo de







medición, tendencia y desviación estándar (mm/año), desviación estándar del residuo entre la serie original y la ajustada, latitud, longitud y nombre de la estación.

200/001	13	1948	- 1962	5.28 +/-	2.39	35.5	43 19 N	01 55 W	PASAJES
200/006	7	1993	- 1999	3.29 +/-	2.36	12.5	43 20 N	03 02 W	BILBAO
200/011	36	1944	- 1987	-0.25 +/-	0.61	50.8	43 28 N	03 48 W	SANTANDER I
200/012	10	1963	- 1974	-2.94 +/-	4.14	42.3	43 28 N	03 46 W	SANTANDER II
200/030	243	42	1944 - 1987	4.14 +/-	0.77	64.3	43 22 N	08 24 W	LA CORUNA I
200/031	243	30	1955 - 1997	0.45 +/-	0.51	32.5	43 22 N	08 24 W	LA CORUNA II
200/032	243	7	1993 - 1999	7.50 +/-	6.83	36.2	43 22 N	08 23 W	LA CORUNA III
200/041	54	1944	- 1999	2.64 +/-	0.37	44.3	42 14 N	08 44 W	VIGO
210/011	6	1978	- 1984	3.02 +/-	4.78	24.8	41 41 N	08 50 W	VIANA
210/012	30	1956	- 1985	0.54 +/-	1.33	62.9	41 11 N	8 42 W	LEIXOES
210/013	9	1979	- 1995	-2.66 +/-	1.73	28.2	40 39 N	08 45 W	AVEIRO
210/021	246	95	1882 - 1991	1.20 +/-	0.10	31.8	38 41 N	09 25 W	CASCAIS
210/023	12	1972	- 1984	0.08 +/-	1.67	20.8	38 42 N	09 08 W	LISBON
210/026	13	1977	- 1996	1.52 +/-	0.92	20.7	38 30 N	08 54 W	SETROIA
210/028	8	1978	- 1991	1.07 +/-	1.28	13.4	37 57 N	08 53 W	SINES
210/031	63	1909	- 1992	1.31 +/-	0.17	30.6	37 06 N	08 40 W	LAGOS
215/001	248	20	1962 - 1996	1.35 +/-	1.03	43.6	36 08 N	05 21 W	GIBRALTAR
220/002	10	1977	- 1987	-0.56 +/-	2.53	26.0	36 32 N	06 19 W	CADIZ II
220/003	33	1961	- 1999	4.77 +/-	0.71	46.1	36 32 N	06 17 W	CADIZ III
220/008	5	1993	- 1998	16.45 +/-	8.26	31.8	36 48 N	6 20 W	BONANZA
220/011	8	1991	- 1998	6.38 +/-	2.97	19.3	36 07 N	05 26 W	ALGECIRAS
220/021	43	1944	- 1998	0.17 +/-	0.44	45.6	36 00 N	05 36 W	TARIFA
220/031	38	1944	- 1998	1.94 +/-	0.45	44.8	36 43 N	04 25 W	MALAGA
220/032	6	1993	- 1999	7.39 +/-	4.55	24.1	36 43 N	4 25 W	MALAGA II
220/041	15	1978	- 1997	0.55 +/-	1.08	23.1	36 50 N	02 29 W	ALMERIA
220/046	5	1978	- 1985	0.20 +/-	1.14	6.6	37 36 N	00 58 W	CARTAGENA
220/051	25	1952	- 1996	-0.81 +/-	0.49	37.0	38 20 N	00 29 W	ALICANTE I
220/052	30	1960	- 1995	-0.85 +/-	0.27	15.7	38 20 N	00 29 W	ALICANTE II
220/056	3	1995	- 1997	29.00 +/-	12.70	18.0	39 28 N	0 20 W	VALENCIA
220/061	4	1993	- 1999	2.85 +/-	8.33	36.1	41 21 N	2 10 E	BARCELONA
220/081	10	1990	- 1999	5.88 +/-	2.46	22.4	42 03 N	03 12 E	L'ESTARTIT
340/001	249	17	1946 - 1963	1.08 +/-	1.58	32.5	35 54 N	05 19 W	CEUTA
340/004	5	1944	- 1948	-2.20 +/-	2.57	8.1	35 15 N	03 55 W	VILLA SANJURJO
340/008	249	4	1993 - 1998	0.07 +/-	5.98	22.4	35 54 N	05 19 W	CEUTA-D
360/011	7	1977	- 1983	5.43 +/-	4.80	25.4	38 39 N	27 14 W	ANGRA DO HEROISMO
365/001	250	7	1977 - 1994	-1.34 +/-	1.08	15.0	32 38 N	16 54 W	FUNCHAL
370/011	10	1950	- 1959	-24.79 +/-	3.04	27.7	28 41 N	17 45 W	SANTA CRUZ DE LA PALMA
370/021	56	1927	- 1989	1.65 +/-	0.19	26.5	28 29 N	16 14 W	SANTA CRUZ DE TENERIFEI
370/032	4	1995	- 1999	4.09 +/-	7.41	21.9	28 29 N	16 14 W	TENERIFE
370/045	251	7	1992 - 1998	8.14 +/-	2.22	11.7	28 08 N	15 25 W	LAS PALMAS C {P LUZ}

Tabla 5.1. Datos de variación de nivel del mar en el litoral español del PSMSL

En la figura 5.3 se muestra cada localidad con la tendencia y la desviación típica correspondiente.





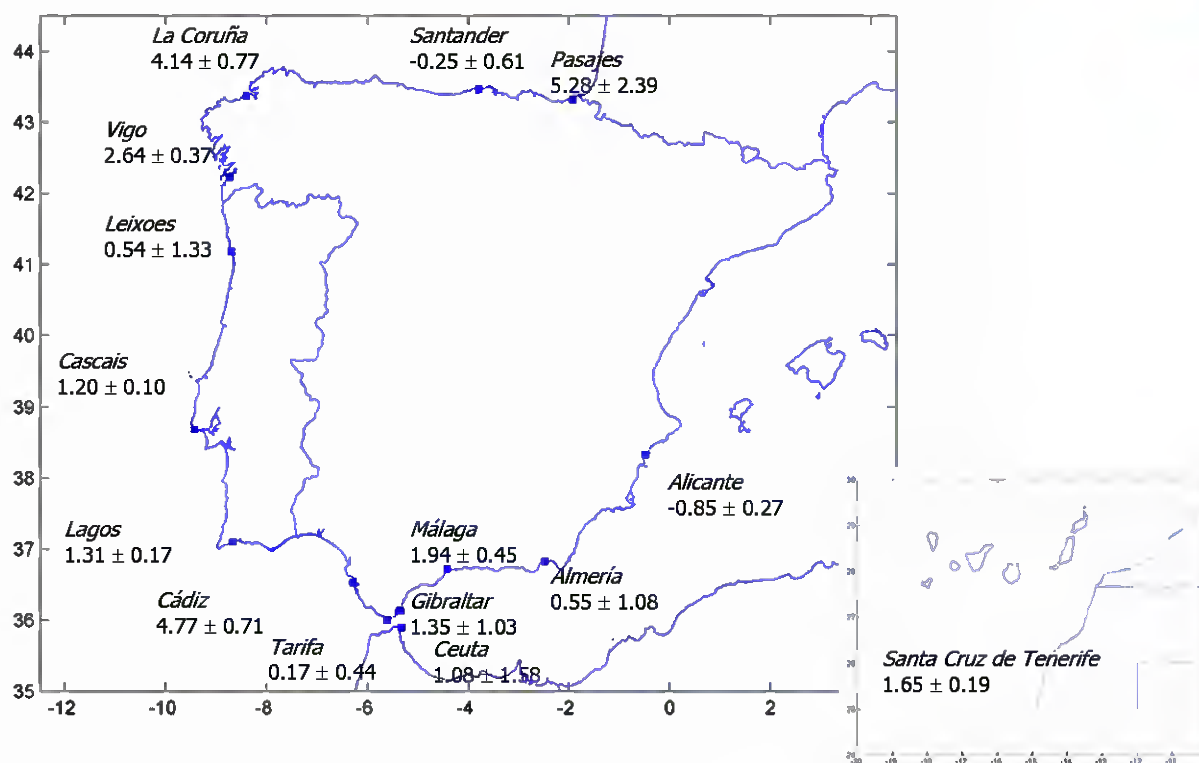


Figura 5.3. Tasa de variación del nivel del mar (PSMSL, Febrero 2001)

Los valores expuestos en la figura superior muestran una tendencia general de aumento de nivel del mar, identificándose sin embargo diferencias importantes entre puntos espacialmente cercanos, como por ejemplo Pasajes y Santander.

Para complementar esta información se analizaron las series de la base de datos de REDMAR, con mareógrafos en todo el litoral español (ver figura 5.1) y los registros de Vigo y Newlyn disponibles en la red GLOSS. La longitud de las series de REDMAR es inferior a 10 años, por lo que aunque faciliten información del comportamiento del nivel del mar en la última década, no pueden utilizarse para determinar variaciones de largo periodo.

La figura 5.4 muestra la variación de nivel medio anual en las series de Vigo (1943-1990) y Newlyn (1915-2001), ajustada linealmente mediante mínimos cuadrados. La serie de Newlyn es de especial interés debido a la longitud del registro, de 86 años de duración. En ambos casos la tasa de variación de nivel medio presenta tendencia positiva, con un valor de 2.47 y 1.64 mm/año en Vigo y Newlyn respectivamente. En el caso de Vigo se observa una diferencia de 0.17 mm/año con respecto al valor proporcionado por PSMSL.



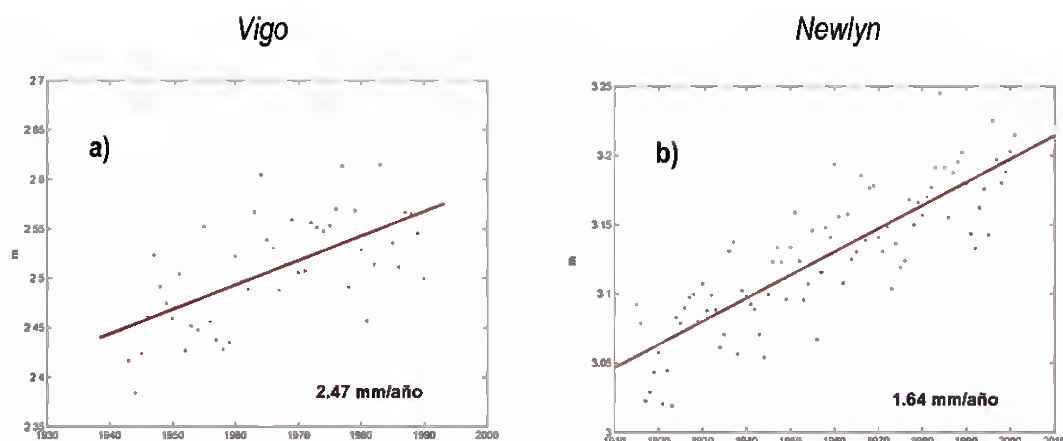


Figura 5.4. En el panel *a* se presenta el ajuste realizado a la serie de Vigo y en el panel *b* a Newlyn.

La ausencia de series suficientemente largas ha dificultado el estudio de variación del nivel del mar en el litoral español. Sin embargo, existen antecedentes en los puntos con registros prolongados, que fueron consultados para comparar los resultados previamente expuestos.

Marcos et al. (2004) analizan series de nivel del mar de tres mareógrafos gestionados por el IEO en Santander, La Coruña y Vigo, con un período de medición comprendido entre 1943 y 2001. Las series de los mareógrafos de REDMAR de las correspondientes localidades, con datos de 1992 al 2001, fueron utilizados para comprobar la consistencia de los registros de larga duración en la última década.

Los autores realizan una extensa revisión de los datos utilizados en el estudio para considerar los efectos no asociados a la variación del nivel del mar que puedan interferir en el cálculo de la tendencia. Los principales problemas que se plantean en el análisis de variación del nivel del mar, son los cambios no documentados en el nivel de referencia del mareógrafo y la ausencia de datos en el registro. De ambos factores, el primero es el más importante, puesto que contribuye modificando la variación del nivel medio y falseando los datos de tendencia obtenidos. La ausencia de datos también afecta al cálculo de tendencias, adquiriendo mayor importancia al disminuir la longitud del registro. Mediante el uso de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), Marcos et al. (2004), detectan los cambios de nivel anómalos en el registro y completan los intervalos que presentan carencia de datos.

El principal resultado del análisis en EOF es la descomposición en modos ortogonales según el criterio de máxima variabilidad. En este caso la técnica EOF se aplicó a la series diarias de Santander, Coruña y Vigo para el período comprendido entre 1943-2001. Cada





registro del nivel del mar se puede descomponer en una suma de modos, independientes entre sí, tal que:

donde

$$\eta(x,t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) E^i(x)$$

$E_i(x)$  son los autovectores y proporcionan información de la variación espacial de la serie, y  $A_i(t)$  es su correspondiente amplitud temporal.

La serie original se puede reconstruir con la suma de los M modos principales, lo que permite detectar cambios anómalos y completar intervalos sin datos.

En el panel izquierdo de la figura 5.5 se presentan conjuntamente la serie observada (tras aplicar un filtro de 10 años de media móvil) y la predicción realizada con la técnica EOF. En el panel derecho se muestran las diferencias entre los datos observados y la predicción. Cabe destacar el período comprendido entre 1955 y 1965, donde se observan mayores diferencias entre los datos y la predicción. Esta variación sugiere la presencia de un cambio de nivel en una o más estaciones durante estos años, que coincide con un aumento en el nivel del mar observado en los tres puntos (panel izquierdo). Sin embargo, mientras en Santander y en Vigo el incremento es aproximadamente de 7 cm, en la Coruña es de 3 cm. Conjuntamente, se observa que la diferencia entre la serie original y la predicha en la Coruña, presenta un cambio de signo con respecto a Vigo y Santander. Esta información alude a un cambio en el nivel de referencia del mareógrafo de La Coruña en el período comprendido entre 1955 y 1965.



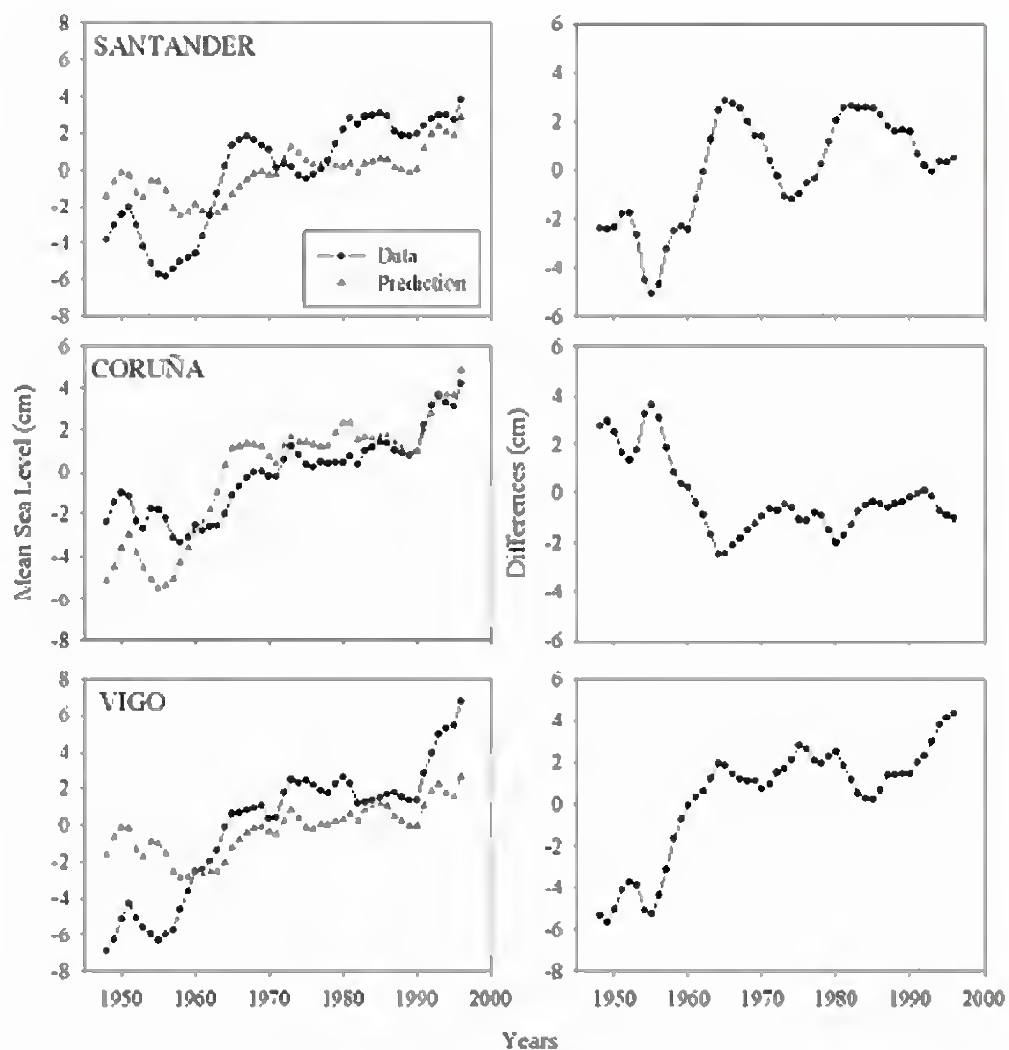


Figura 5.5. Panel izquierdo: comparación entre el promedio de la serie observada y la predicción realizada con la técnica EOF. Panel derecho: diferencias obtenidas entre ambas series.





Se repitió el mismo análisis corrigiendo el cambio de nivel del mareógrafo observado en La Coruña. Los resultados se muestran en la figura 5.6, comparando la serie promediada observada y la predicha con la técnica EOF (panel izquierdo) y las diferencias entre ambas series (panel derecho). Se observa un mejor ajuste entre los datos y la predicción.

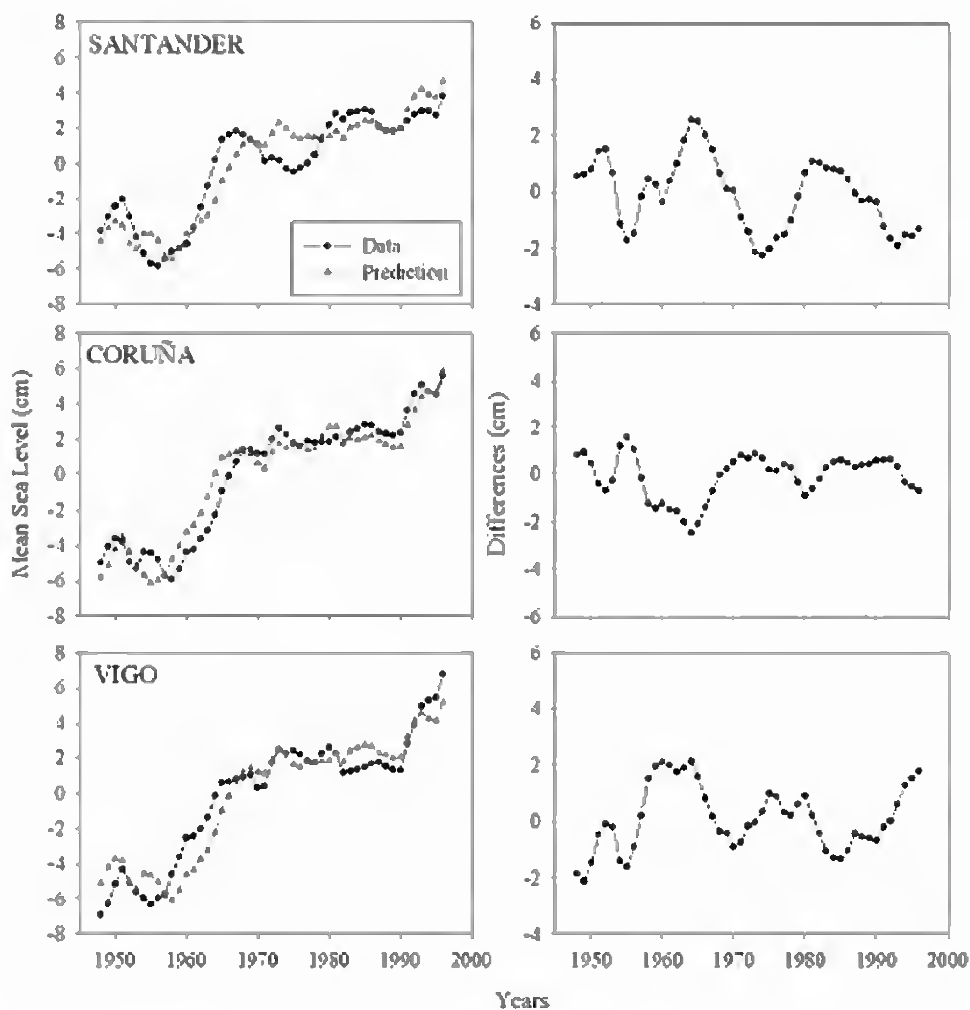


Figura 5.6. Comparación entre las serie observadas y predichas (panel izquierdo) y las diferencias entre ambas (panel derecho) después de corregir el registro de La Coruña.





La variación resultante en el análisis de tendencias realizado a las series corregidas de nivel del mar se presenta en la tabla 5.2.

Estaciones	1943-2001
	Tendencia nivel del mar (mm/año)
IEO-Santander	2.12
IEO-Coruña	2.51
IEO-Vigo	2.91

Tabla 5.2. Variación del nivel del mar y marea meteorológica. Marcos et al. (2004)  
(Proyecto EPPE-IMEDEA)

Los resultados indican que durante la segunda mitad del siglo XX, el nivel del mar ha ascendido con una tasa de variación de 2.12, 2.52 y 2.91 mm/año en Santander, Coruña y Vigo respectivamente. Nótese que existen diferencias con los resultados obtenidos por el PSMSL (ver tabla 5.1), que pueden ser atribuidas a que el análisis corresponde a períodos diferentes. También se observa que la variación de nivel del mar en Newlyn es menor que la expuesta en Vigo, Coruña y Santander. Igual que en el caso anterior esta diferencia puede estar asociada a la longitud del registro. La serie de Newlyn es de 86 años, abarcando desde 1910 hasta el 2001, mientras que los registros de Santander abarcan la segunda mitad del siglo XX. Si la variación de nivel del mar ha variado a lo largo del siglo, la longitud del registro y el período utilizado para el análisis influyen en el valor de la tendencia obtenido.

Marcos et al. (2004) encontraron correlación entre la evolución de la temperatura media del Atlántico Norte (Levitus et al., 2000) y las observaciones de nivel del mar, lo que parece indicar que el incremento de temperatura oceánica es el responsable de la subida del nivel del mar en los puntos estudiados.

Los autores también concluyen que las tendencias obtenidas en la última década no implican necesariamente una aceleración en la subida del nivel del mar.





### 5.3 Análisis de tendencias de la marea astronómica

Se analiza la tendencia de la marea astronómica considerando que este factor no es despreciable en las variaciones del nivel del mar. Trabajos recientes buscan una relación de la marea con cambios en el clima terrestre. (Keeling y Whorf, 1997,2000), sugieren que el potencial de marea puede modular el clima en escalas temporales de largo y corto período. Flick et al. (2003), utiliza datos de mareógrafos en Estados Unidos pertenecientes a la NOAA/NOS para calcular su tendencia y determinar si son estadísticamente significantes. En este trabajo encuentran cambios significantes en la carrera de marea, así como en el rango de la pleamar y bajamar. Los autores sugieren que la marea astronómica debiera ser un factor a tener en cuenta, además del nivel medio, en los estudios relacionados con la variación del nivel del mar.

Las series de larga duración correspondientes a Vigo y Newlyn han sido analizadas con una metodología similar a la utilizada por Flick et al. (2003).

Los parámetros a estudiar son los siguientes:

- Nivel medio (NM)
- Media de las pleamares (MPM)
- Media de las bajamares (MBM)
- Carrera de marea, definida como MPM-MBM
- Diferencia entre la pleamar y el nivel medio (MPM-NM)
- Diferencia entre la bajamar y el nivel medio (MBM-NM)

El procedimiento de análisis se divide en varios puntos:

- División de la serie temporal del nivel del mar en intervalos anuales.
- Análisis armónico efectuado a cada año y predicción de la marea astronómica con los constituyentes obtenidos en el período correspondiente.
- Para evaluar la tendencia de la marea astronómica, se ha realizado el ajuste considerando la tendencia lineal y un armónico de 18.6 años (representando la variación nodal del ciclo lunar) como se muestra a continuación:

$$y = a + bt + c \frac{\sin 2\pi t}{T} + d \frac{\cos 2\pi t}{T}$$





donde  $t = 1, \dots, n$ , siendo  $n$  el número de años  
 $y$  = variable a analizar  
 $T = 18.6$  años

El sistema a resolver es  $AX = b$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \sin 2\pi x_{(1)} & \cos 2\pi x_{(1)} \\ & & T & T \\ 1 & 2 & \sin 2\pi x_{(2)} & \cos 2\pi x_{(2)} \\ & & T & T \\ 1 & 3 & \sin 2\pi x_{(3)} & \cos 2\pi x_{(3)} \\ & & T & T \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & \cdot & & \\ 1 & n & \sin 2\pi x_{(n)} & \cos 2\pi x_{(n)} \\ & & T & T \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} y_{(1)} \\ y_{(2)} \\ y_{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{(n)} \end{bmatrix}}_b$$

donde  $y$  puede ser:

- Serie temporal de nivel medio anual (NM)
- Serie temporal de la pleamar media anual (MPM)
- Serie temporal de la bajamar media anual (MBM)
- Serie temporal de la carrera de marea (MPM – MBM)
- Serie temporal de la diferencia entre la pleamar y el nivel medio (MPM – NM)
- Serie temporal de la diferencia entre la bajamar y el nivel medio (BM – NM)

En cada uno de estos casos se ha realizado el ajuste por mínimos cuadrados, obteniendo los coeficientes  $a, b, c$  y  $d$  resolviendo:

$$X = A^{-1} b$$







Las figuras 5.7 y 5.8 muestran los resultados obtenidos en la serie de Vigo y Newlyn respectivamente.

Vigo

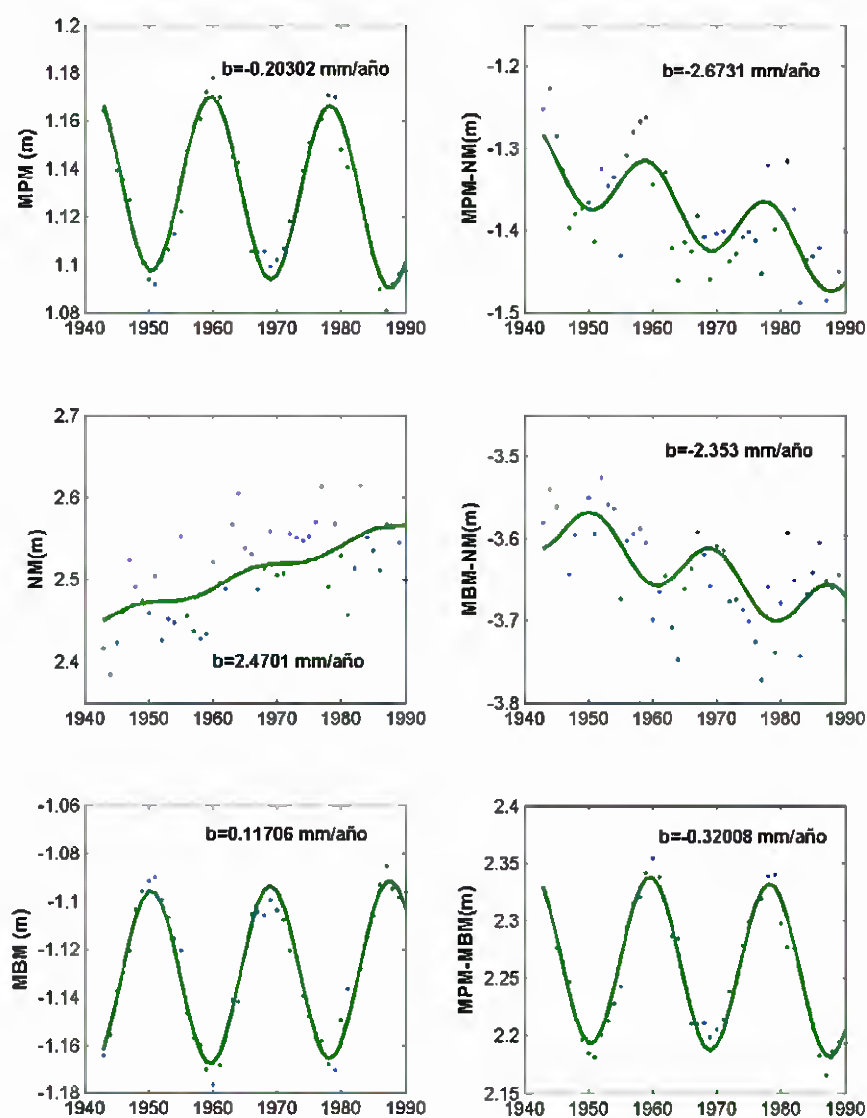


Figura 5.7. Análisis de variación de la marea astronómica para la serie de Vigo.



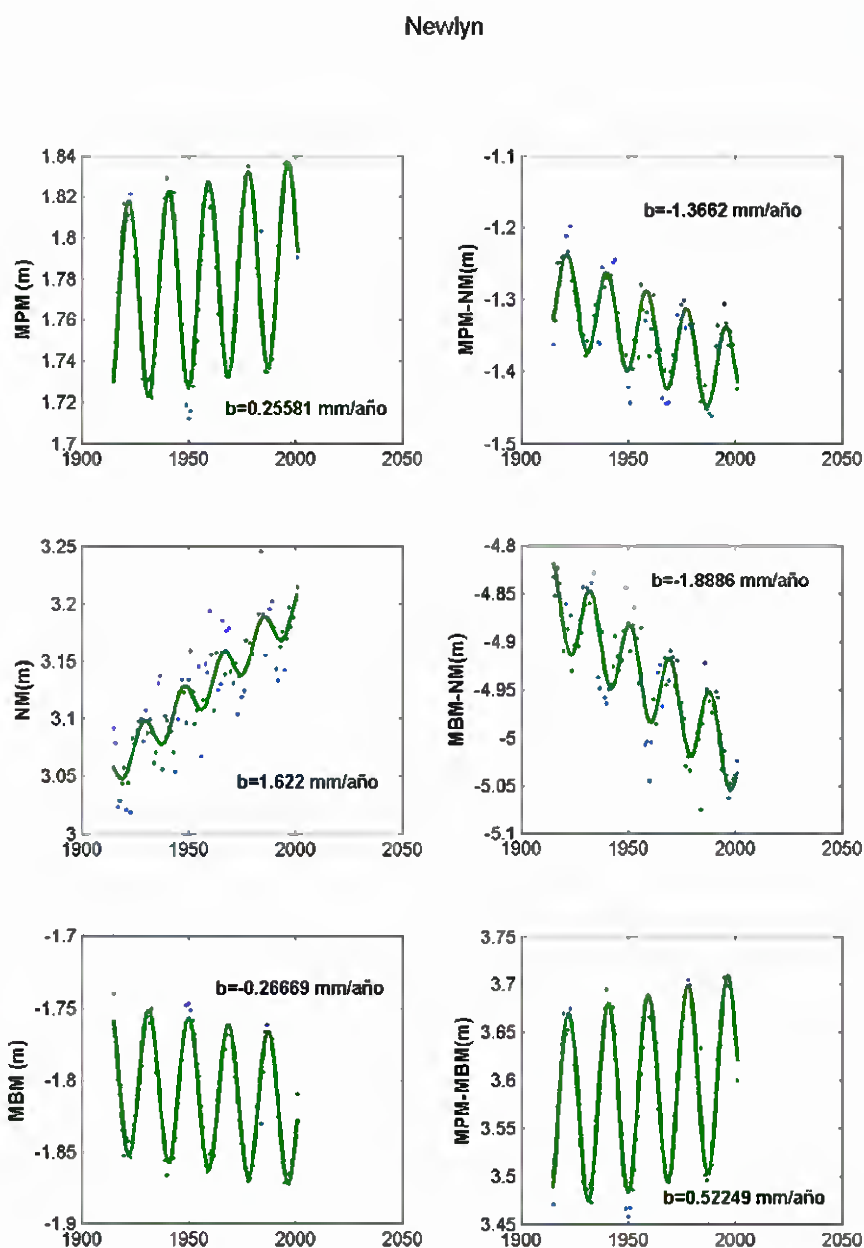


Figura 5.8. Análisis de variación de la marea astronómica para la serie de Newlyn

El análisis de tendencias de la marea astronómica en las series de Vigo y Newlyn, muestra que su variación es un orden de magnitud menor que la asociada al nivel medio, siendo este factor predominante en el cambio del nivel del mar.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

---



**FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO  
Y NIVEL DEL MAR**

**CAPÍTULO 6. REFERENCIAS**

---



## 6. REFERENCIAS

BALDACCI, A. et al. (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.

CIESLIKIEWICZ, W.; GRAFF, J.(1996). Sea state parameterisation using empirical orthogonal functions. *Coastal Engineering* 1996, Vol. 1, pp 703-716.

DUAN, Q. et al. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, Vol. 28(4), pp 1015-1031.

DUAN, Q. et al. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, pp 265-284.

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.

EPPE. Recomendaciones para Obras Marítimas. ROM 0.0, ROM 0.3-91, ROM 0.4-95. Ministerio de Fomento. Puertos del Estado.

Flick, R. E., Murray, J. F., and Ewing, L. (2003), Trends in United States Tidal Datum Statistics and Tide Range, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129, 155-164.

GIOC (2002). <http://www.smc.unican.es/>

GLOSS (The Global Sea Level Observing System) ( <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>)

Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T.P. and Stephens, L. (2000) Warming of the World Ocean. *Science*, 287, 2225-2229.

Keeling, C. D. & Whorf, T.P. (1997), Possible forcing of global temperature by the oceanic tides, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 94, 8321-8328.

Marcos, M., D. Gomis, S. Monserrat, E. Álvarez, B. Pérez, J. García- Lafuente (2004), Consistency of long sea-level time series in the Northern coast of Spain, enviado a *J. Geophysical Research*.





Smith, R.L. (2003) "Statistics of extremes, with applications in environment, insurance and finance" (<http://www.stat.unc.edu/postscript/rs/semstatrls.ps>)

Vikebo, F., Furevik, T., Furnes, G., Kvamsto, N., Reistad, M. (2003) "Wave height variations in the North Sea and on the Norwegian Continental Shelf, 1881-1992", Continental Shelf Research, 23, 251-263.



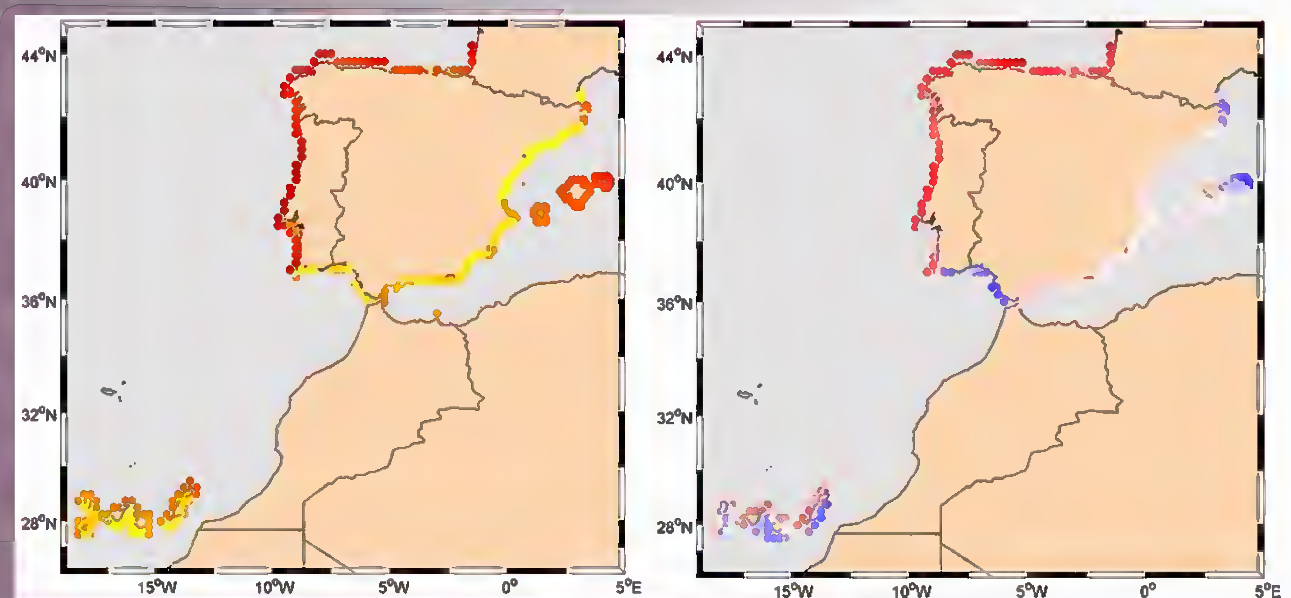


MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



## FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Fase I-c) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

### **FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

### **FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

### **FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsibles cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Fase I-c:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Fase I-c. Evolución histórica en la dinámica costera en el siglo XX.**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**ÍNDICE**

---

## Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....	1.1
Capítulo 2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE .....	2.1
2.1 Régimen medio de altura de ola significativa .....	2.1
2.2 $H_{s12}$ (altura de ola superada sólo 12 horas al año).....	2.2
2.3 Dirección del flujo medio de energía .....	2.4
2.4 Duraciones de excedencias de altura de ola significativa.....	2.6
2.5 Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias .....	2.8
2.6 Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades.....	2.10
Capítulo 3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA METEOROLÓGICA.....	3.1
3.1 Régimen medio de marea meteorológica .....	3.1
3.2 Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias.....	3.1
3.3 Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades .....	3.2
Capítulo 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO .....	4.1
4.1 Régimen medio de viento.....	4.1
4.2 Dirección del transporte potencial eólico .....	4.2
4.3 Duraciones de excedencias de viento .....	4.4
4.4 Régimen extremal de viento: frecuencias.....	4.5
4.5 Régimen extremal de viento: intensidades .....	4.6
Capítulo 5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA NIVEL MEDIO DEL MAR.....	5.1
Capítulo 6. RESUMEN DE RESULTADOS.....	6.1



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---



## 1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presentan los resultados de tendencias, para toda la costa española de diversos parámetros representativos de los regímenes medio y extremal de clima marítimo y de las tendencias de variación del nivel medio del mar.

### Oleaje (Altura de ola significativa, Período medio, Dirección del oleaje):

- Régimen medio de altura de ola significativa.
- $H_{s12}$  (altura de ola superada sólo 12 horas al año).
- Dirección del flujo medio de energía.
- Duraciones de excedencias de altura de ola significativa.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias.
- Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades.
- $H_{T50}$  (altura de ola significativa de 50 años periodo de retorno).

### Marea meteorológica:

- Régimen medio de marea meteorológica.
- Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias.
- Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades.
- $MM_{T50}$  (marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno).

### Viento:

- Régimen medio de viento.
- Dirección del transporte potencial eólico.
- Duraciones de excedencias de viento.
- Régimen extremal de viento: frecuencias.
- Régimen extremal de viento: intensidades.
- $W_{T50}$  (velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno).

### Nivel del mar

- Tendencia actual
- Prognosis de cambio

Las bases de datos utilizadas, así como las metodologías para el análisis de tendencias han sido descritas anteriormente en el Documento de la Fase I-b. A continuación se describe los resultados obtenidos y las características más relevantes observadas. Los resultados de tendencias se presentan de forma gráfica con un código de colores ('rojo' significa aumento y 'azul' significa disminución). Para la representación de los resultados de





tendencias de intensidad de eventos extremos se ha representado sólo la variable de periodo de retorno de 50 años y su variación, ya que su comportamiento está muy relacionado con las variaciones obtenidas para los eventos extremos analizados. Es importante destacar que las variaciones que se describen a continuación no pertenecen a un estudio de detalle para localidades específicas, sino que son indicadores del comportamiento general de las variables analizadas a lo largo del litoral español y su tendencia de cambio a lo largo de 44 años. Como se describe en la Fase I-d, las tendencias obtenidas pueden ser extrapoladas hasta el año 2050 con cierta fiabilidad. La totalidad de los casos y variables analizadas se presentan en el Anejo I-3 adjunto.





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE**

---

## 2. RESULTADOS OBTENIDOS PARA OLEAJE

### 2.1 Régimen medio de altura de ola significativa

Los resultados son acordes con el comportamiento medio ya conocido del oleaje para nuestras costas. Se detecta una gran diferencia en magnitud entre el Mar Mediterráneo y la costa atlántica del oleaje característico, obteniéndose los valores más grandes en la costa atlántica. Las zonas más energéticas son la costa occidental de Galicia, seguidas por el litoral cantábrico. La región Sur atlántica, Baleares, la Costa Brava y la Costa Blanca presentan alturas de ola significativa medias algo mayores que la magnitud media de la costa mediterránea. En el caso de las islas Canarias se observa una zonación norte-sur, con las olas más grandes en el norte de las islas. (ver figura 2.1)

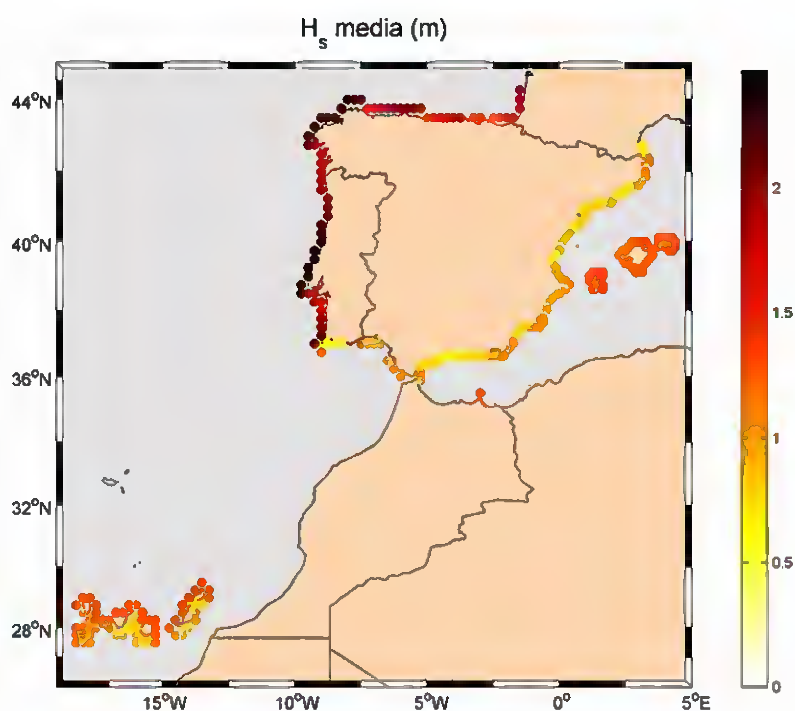


Figura 2.1 Altura de ola significativa media entre el periodo 1958-2001.

Como se aprecia en la figura 2.2, las variaciones resultantes indican un aumento de la altura de ola media en el área Noroccidental del litoral español superior a 10 cm en 40 años y una disminución para el área Sur-oriental. El aumento de la altura de ola significativa media es menor en la región de las Rías Bajas. Las disminuciones de la altura de ola media relevantes en la península se producen en las zonas donde la altura de ola



presentaba olas un poco mayores (Costa Brava, Costa Blanca y costa sur atlántica). Las islas Baleares presentan una disminución mayor al Norte.

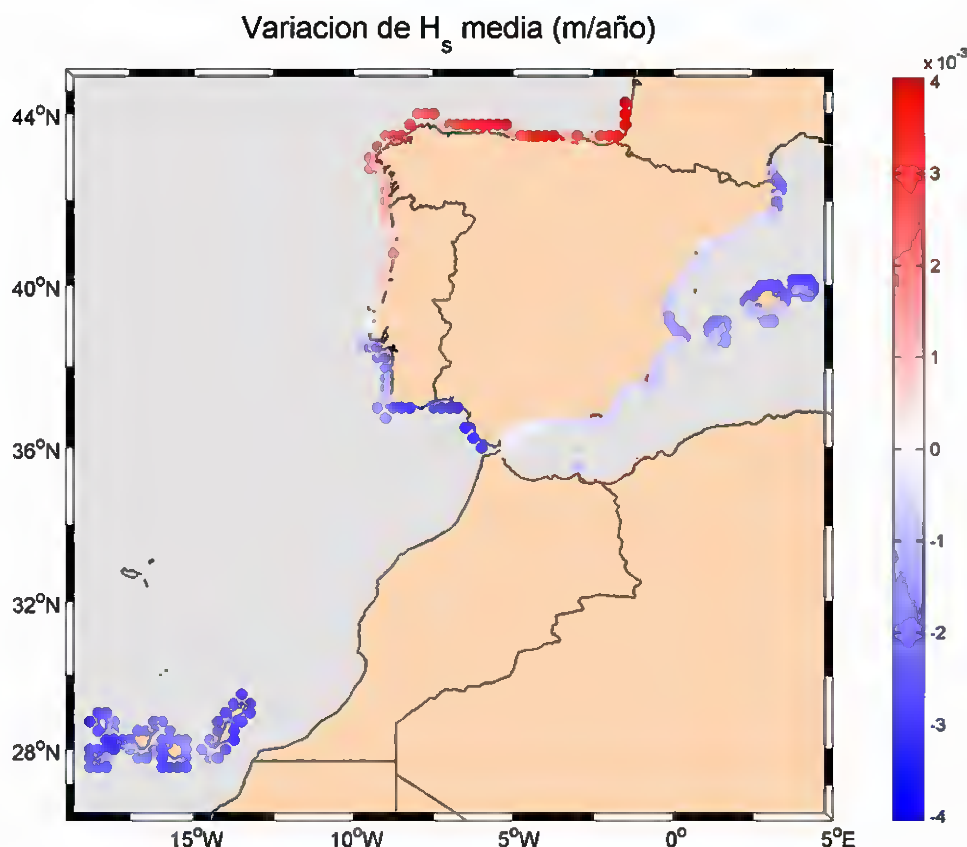


Figura 2.2. Variación de la altura de ola significativa media entre el periodo 1958-2001.

## 2.2 $H_{s12}$ (altura de ola superada sólo 12 horas al año)

Como se puede observar en la figura 2.3, los valores mayores de  $H_{s12}$  se localizan entre Estaca de Bares y Finisterre ( $\approx 6.5$  metros de altura de ola), seguidas de los valores que se alcanzan en el litoral cantábrico y las islas Baleares. A lo largo del litoral mediterráneo, la  $H_{s12}$  resultante presenta valores mayores en torno a Cabo de la Nao y máximos en la Costa Brava. En el caso de Canarias se sigue apreciando una zonación Norte-Sur, de mayor a menor magnitud de  $H_{s12}$ .

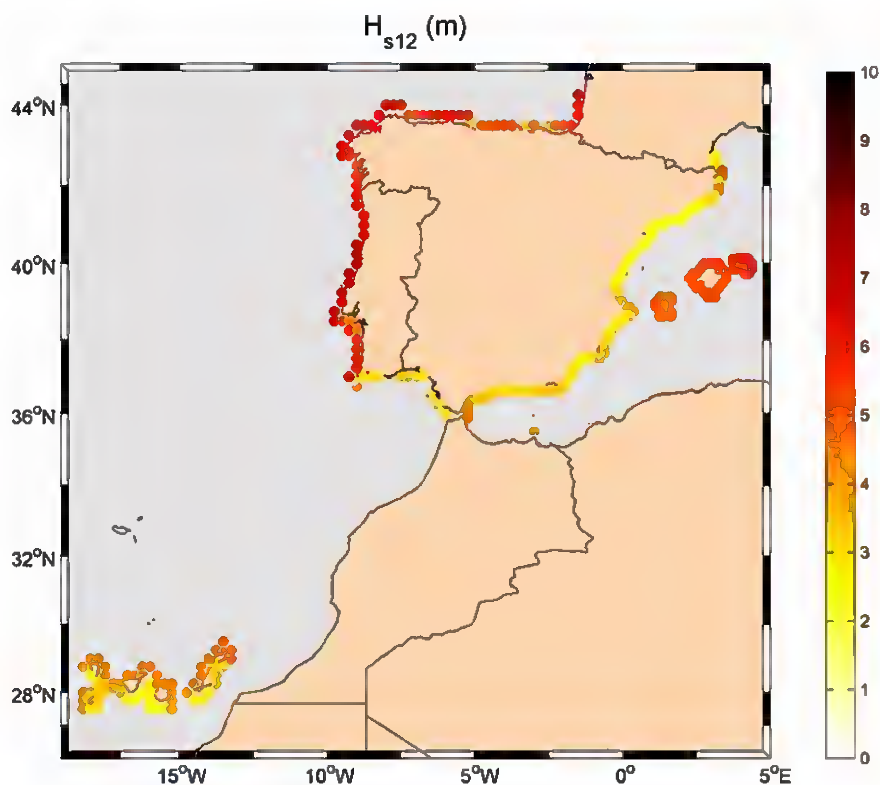


Figura 2.3. Altura de ola significativa superada sólo 12 h. al año entre el periodo 1958-2001.

Se puede apreciar un aumento importante en la zona del Cantábrico y de Galicia (más de medio metro en 40 años), así como en la zona Norte de Canarias. Por el contrario, en el golfo de Cádiz, en la zona Sur de Canarias, en la Costa Brava y en la zona oriental de las Baleares la  $H_{s12}$  ha disminuido en los últimos 40 años. En el resto del Mediterráneo las tendencias son prácticamente nulas. (ver figura 2.4).



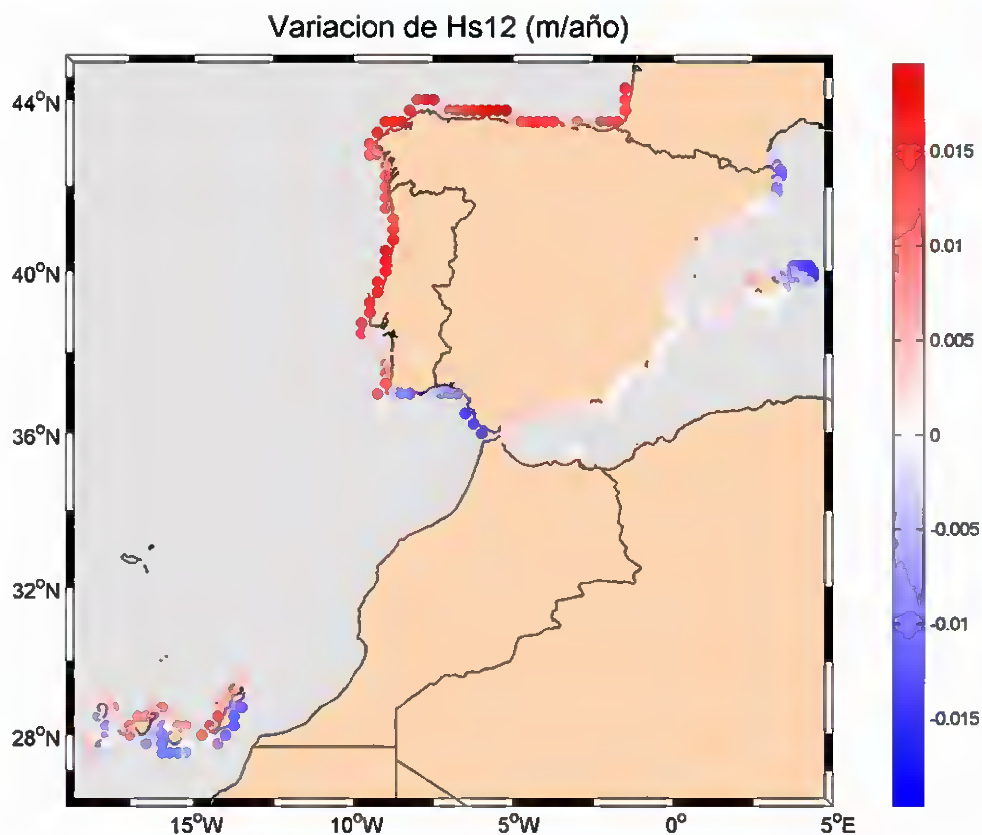


Figura 2.4. Variación de altura de ola significante superada sólo 12 h. al año entre el periodo 1958-2001.

### 2.3 Dirección del flujo medio de energía

En la figura 2.5 se representa la dirección del flujo medio energía del oleaje, que coincide con la dirección de los oleajes más energéticos. Obsérvese, a modo de ejemplo, la dirección Noroeste de todo el Cantábrico, la cual es la más energética.



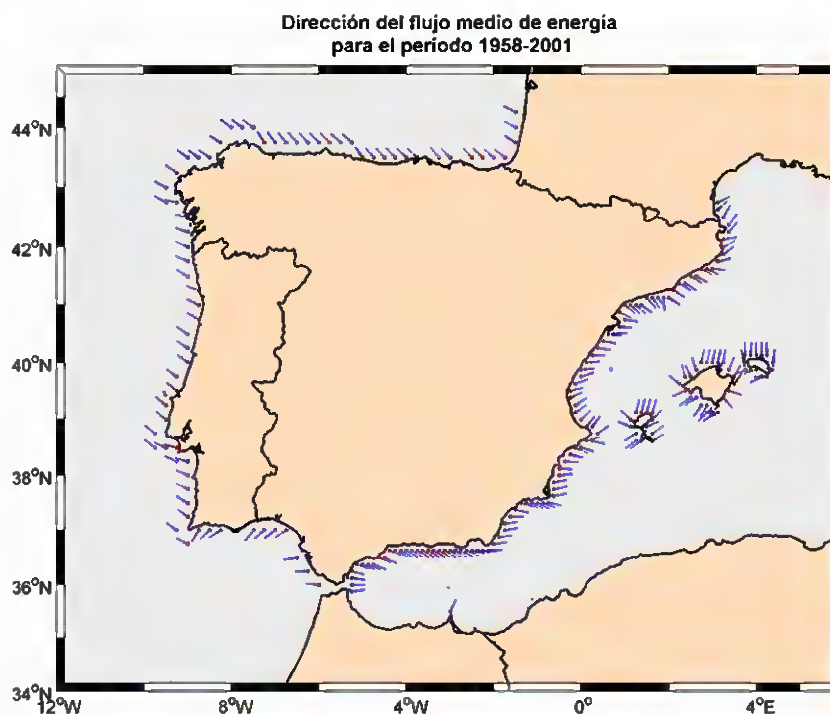


Figura 2.5. Dirección del flujo medio de energía del oleaje para el período 1958-2001.

El análisis de tendencias muestra que las variaciones más reseñables (figure 2.6) son el importante giro hacia la derecha en la costa del Maresme y Costa Brava, así como en la zona sur de Canarias y el cambio de dirección predominante del oleaje, de Suroeste a Sur, en algunas regiones del litoral sur de Baleares. La variación en el ángulo de la Costa Brava y del Maresme indica un cambio en la dirección predominante del oleaje de forma que el oleaje llega a las costas con una dirección más oriental. En el Suroeste de las Islas Baleares se produce un giro antihorario de la dirección predominante del oleaje.



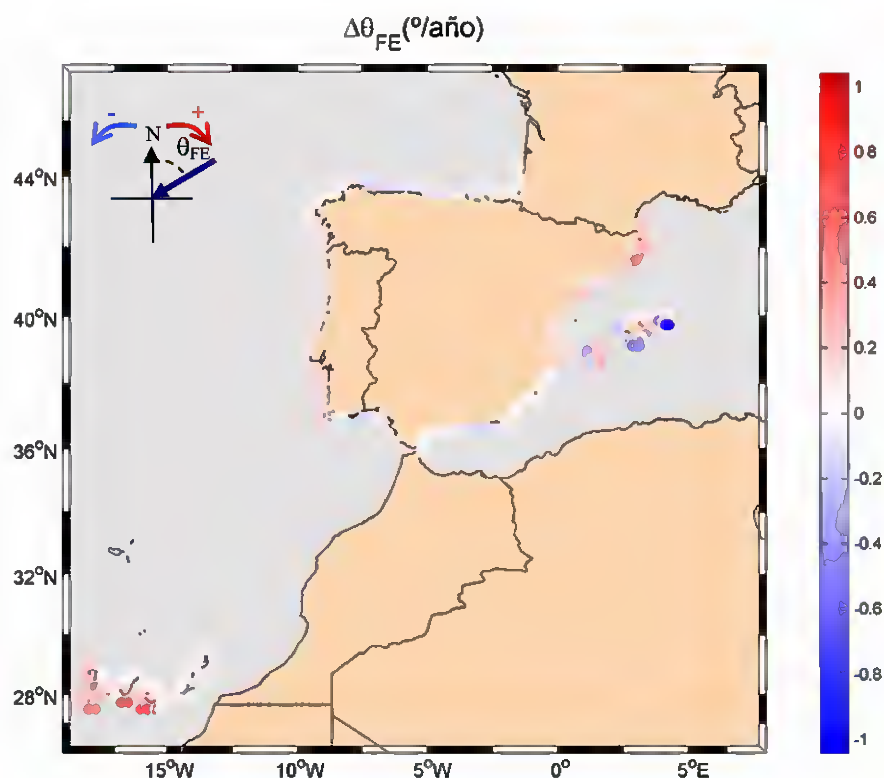


Figura 2.6. Variación de la dirección del flujo medio de energía del oleaje para el periodo 1958-2001.

## 2.4 Duraciones de excedencias de altura de ola significativa

Las duraciones de excedencia de altura de ola presentan una gran relación con la estabilidad de las playas (variación de las bermas o en la profundidad de cierre) y con operatividad de obras marítimas, especialmente en el diseño de puertos. Para el diseño de puertos es de gran utilidad conocer la duración media y la duración máxima más probable anual de excedencia de un determinado umbral de altura de ola significativa. Por este motivo, las variaciones que puedan sufrir estos parámetros a lo largo del tiempo deberían ser tenidas en cuenta en su diseño en función de su vida útil. Para el diseño de un puerto en una determinada localidad sería necesario estudiar la variabilidad, en detalle, de las duraciones de excedencia de altura de ola. La variabilidad que se muestra a continuación permite definir, a grandes rasgos, las tendencias más importantes.

En la figura 2.7 se observa, en la gráfica superior, la variación media anual de la duración media (en horas) de los eventos marítimos que superan el 98 % de las alturas de ola significativas asociadas al régimen medio de cada zona. En la gráfica inferior se muestra la variación anual del tiempo máximo de excedencia más probable cada año (en horas).





Respecto a las variaciones de la duración media se observa un incremento generalizado (en torno a 4 horas tras 44 años) a lo largo del litoral mediterráneo, exceptuando la Costa Brava. Este incremento presenta valores máximos entre Cabo de Palos y Cabo de Gata. Se produce un ligero decremento para la Costa Brava, región Norte de las Islas Baleares y Golfo de Cádiz.

Para el caso de las duraciones máximas las tendencias siguen un patrón parecido a las duraciones medias, pero las variaciones resultantes presentan mayor magnitud en más puntos de la costa. Se observa una disminución de la duración máxima en el Golfo de Cádiz, Costa Brava, costa Norte de Baleares y costa sur del archipiélago canario. Se sigue produciendo un aumento generalizado en la costa mediterránea y se aprecia un leve incremento de la costa cantábrica.

Se puede apreciar un decremento del número de sucesos al año en el Golfo de Cádiz y costa Sur de Canarias.





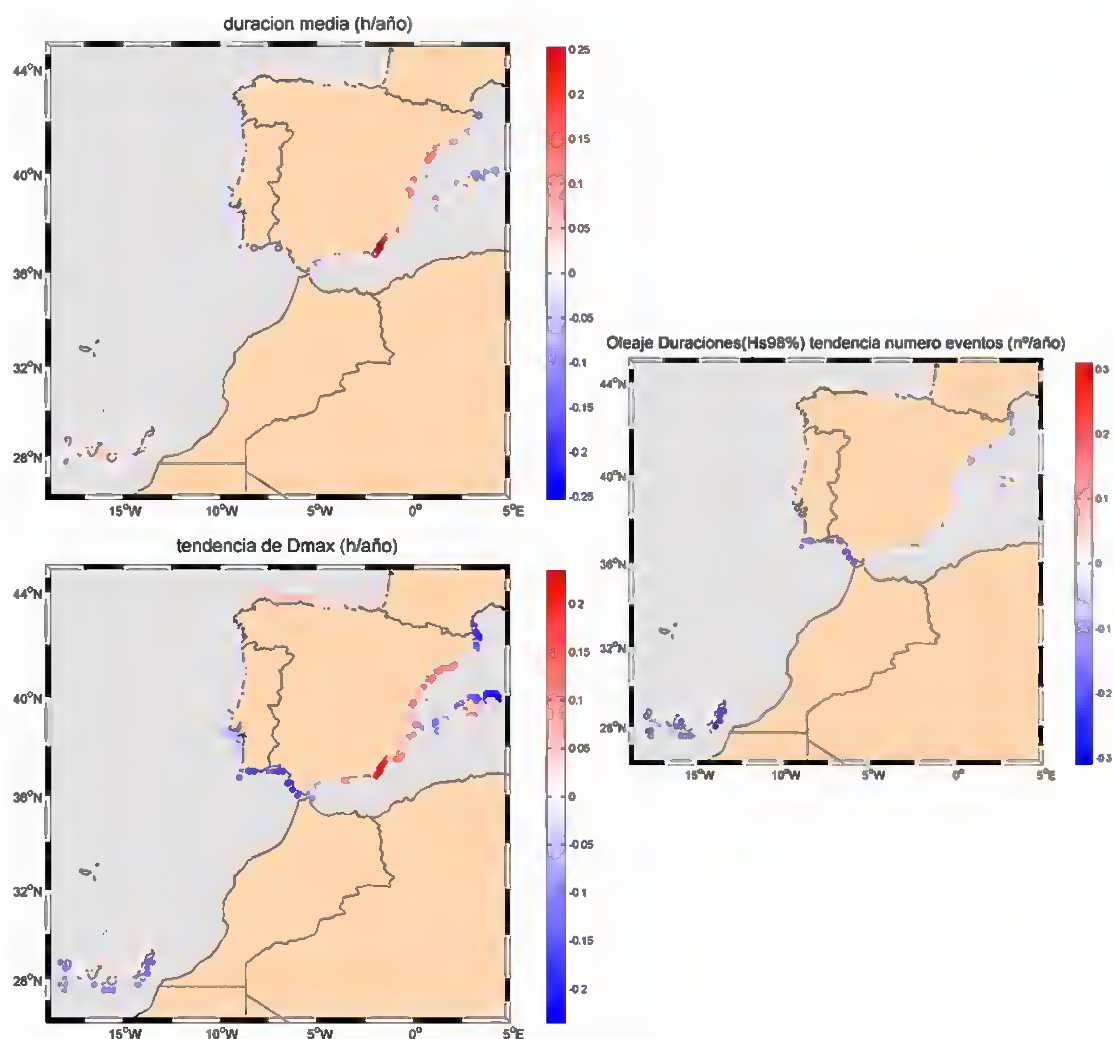


Figura 2.7 Resultados del análisis de tendencias para duraciones de excedencia de altura de ola significativa para el periodo 1958-2001.

## 2.5 Régimen extremal de altura de ola significativa: frecuencias

Respecto al número medio de temporales al año (definidos como sucesos independientes que superan el umbral del percentil del 95% de  $H_s$ ), los resultados indican (figura 2.8) que la frecuencia de eventos extremos es mayor en las islas Baleares que en el resto de España. La frecuencia de estos temporales también es ligeramente mayor en la costa cantábrica y la Costa Brava.



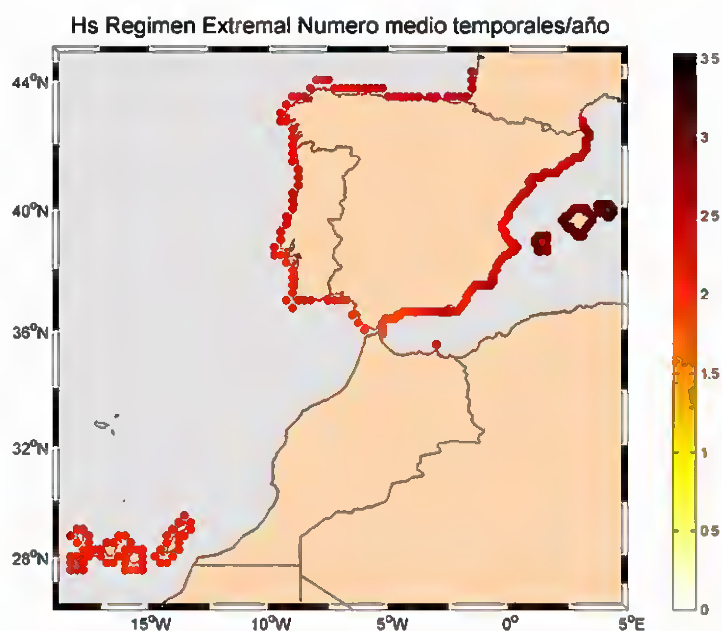


Figura 2.8. Número medio de temporales al año durante el periodo 1958-2001.

En la figura 2.9 se puede observar que en la zona norte de Canarias se ha producido un importante aumento del número de temporales al año (aumento del 30% en 44 años). Asimismo, en la costa oriental del Cantábrico se ha producido un leve aumento del número de temporales. En las Rías Bajas, golfo de Cádiz, Costa Brava y costa Sureste de Canarias es evidente un decremento. Esta disminución es especialmente importante en el Golfo de Cádiz donde, tras 44 años, se ha producido una reducción importante del número de temporales al año.



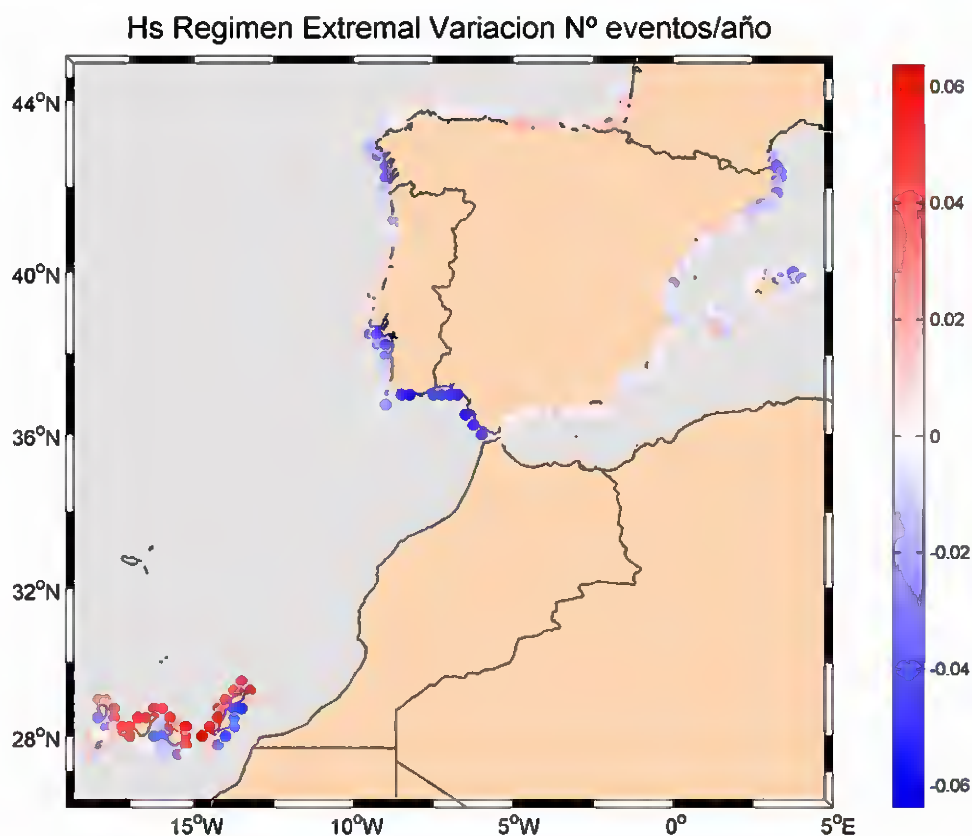


Figura 2.9. Variación del número medio de temporales al año durante el periodo 1958-2001.

## 2.6 Régimen extremal de altura de ola significativa: intensidades

En la figura 2.10 se observa que la  $H_{T50}$  alcanza los valores mayores en la costa gallega y en el Cantábrico, donde es sabido se producen los mayores temporales en España. Los  $H_{T50}$  de menor magnitud se encuentran en el área de Tarragona, la Costa del Sol y la zona Sur de Canarias.



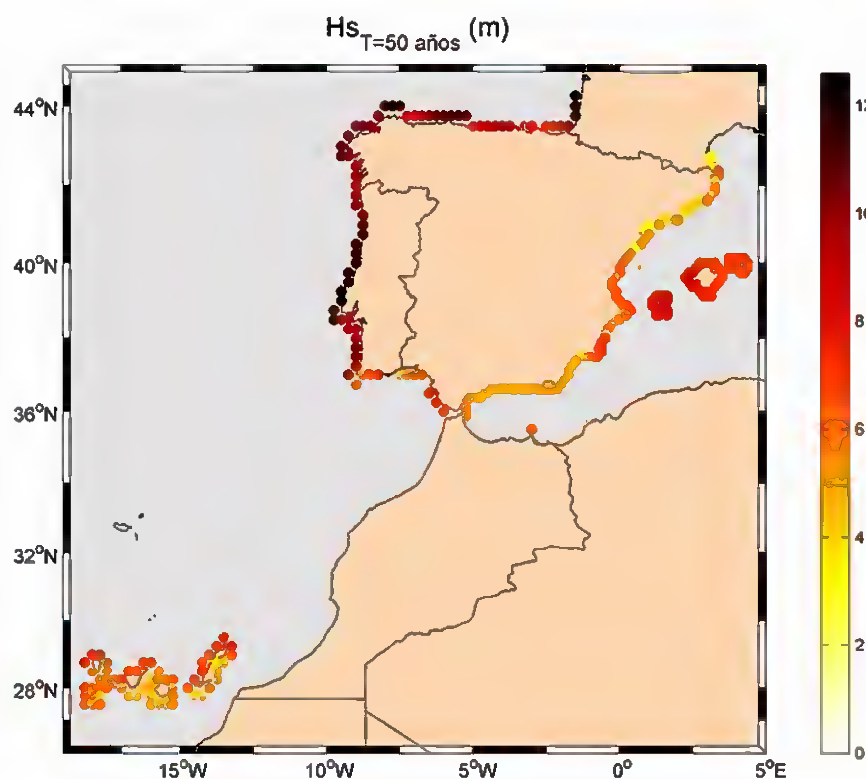


Figura 2.10. Altura de ola significativa de 50 años de periodo de retorno para el periodo 1958-2001.

Las variaciones mostradas en la  $H_{T50}$  (figura 2.11) indican el mayor aumento (en torno a 2 cm/año) entre Estaca de Bares y Finisterre. Se detecta un aumento, algo menor:  $\approx 1$ cm/año, en la costa situada al Norte del archipiélago Canario y un ligero aumento, de milímetros al año, en la costa cantábrica. Se observa una importante reducción de la magnitud de los eventos extremales en el Golfo de Cádiz (mayor de un metro en 40 años) y, de menor variación ( $\approx 1$ cm/año), en la Costa Brava, región más occidental de las islas Baleares y Sureste de Canarias.



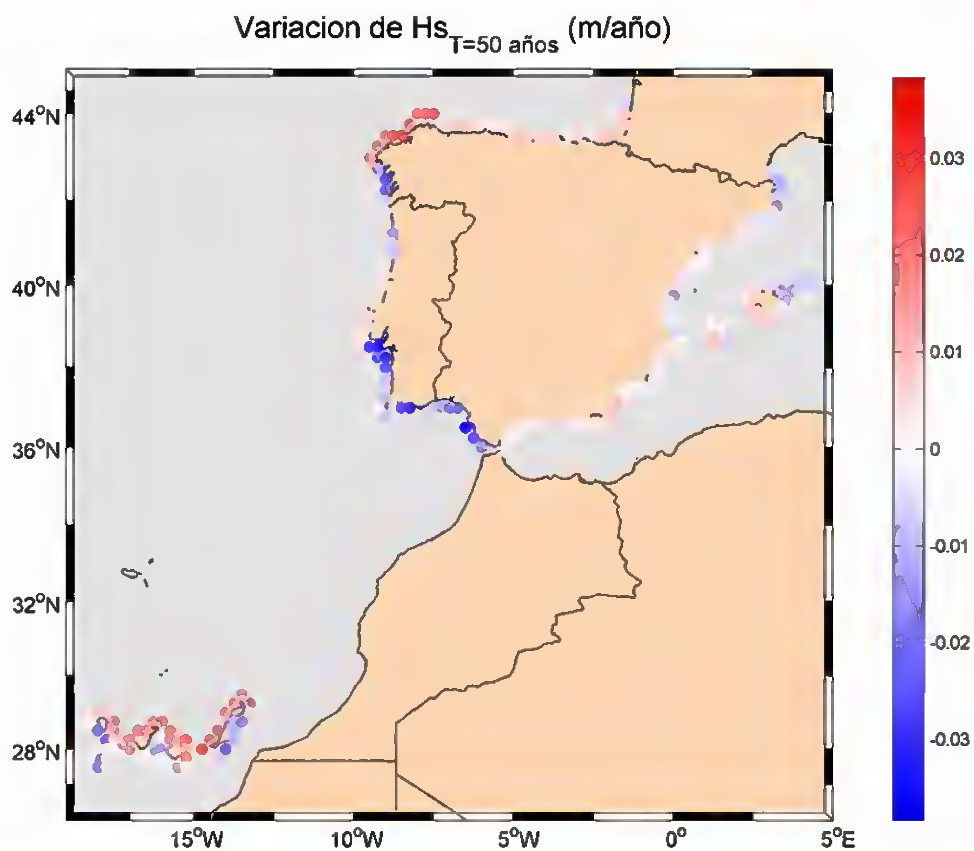


Figura 2.11 Variación de la altura de ola significativa de 50 años de periodo de retorno para el periodo 1958-2001.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA  
METEOROLÓGICA**

---

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA MAREA METEOROLÓGICA

#### 3.1 Régimen medio de marea meteorológica

Se ha producido una disminución de los valores medios de marea meteorológica en la mitad Norte peninsular, en Palma de Mallorca y Menorca (ver figura 3.1). Esta disminución es mayor en la costa noroccidental de Galicia y el litoral occidental asturiano.

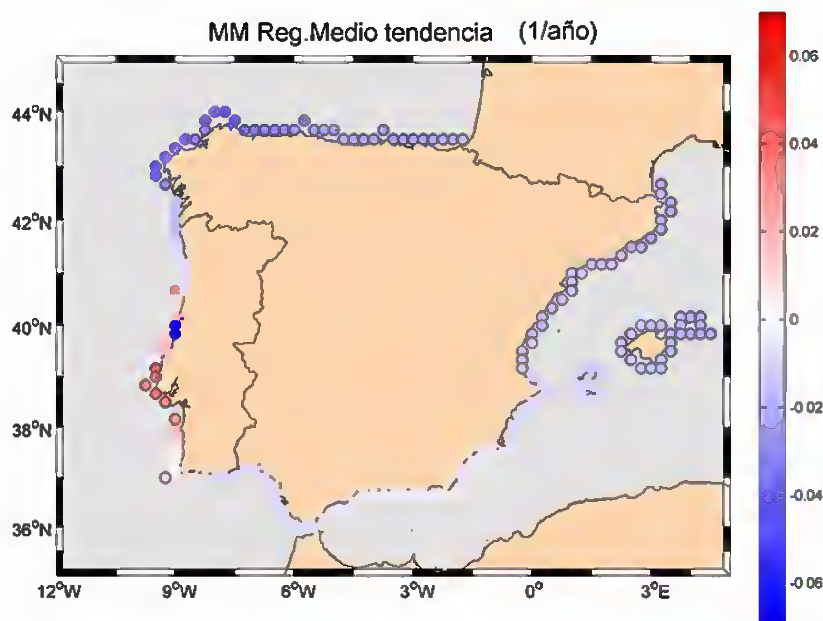


Figura 3.1 Variaciones del régimen medio la marea meteorológica durante el periodo 1958-2001.

#### 3.2 Régimen extremal de marea meteorológica: frecuencias

Se ha producido una disminución generalizada de la frecuencia de los sucesos extremos de marea meteorológica en toda el área estudiada (ver figura 3.2). Esta disminución de la ocurrencia de sucesos presenta una fiabilidad de cálculo estadístico muy alta, especialmente en la costa mediterránea, Baleares y costa Noroeste gallega, donde las tendencias negativas son más acusadas.



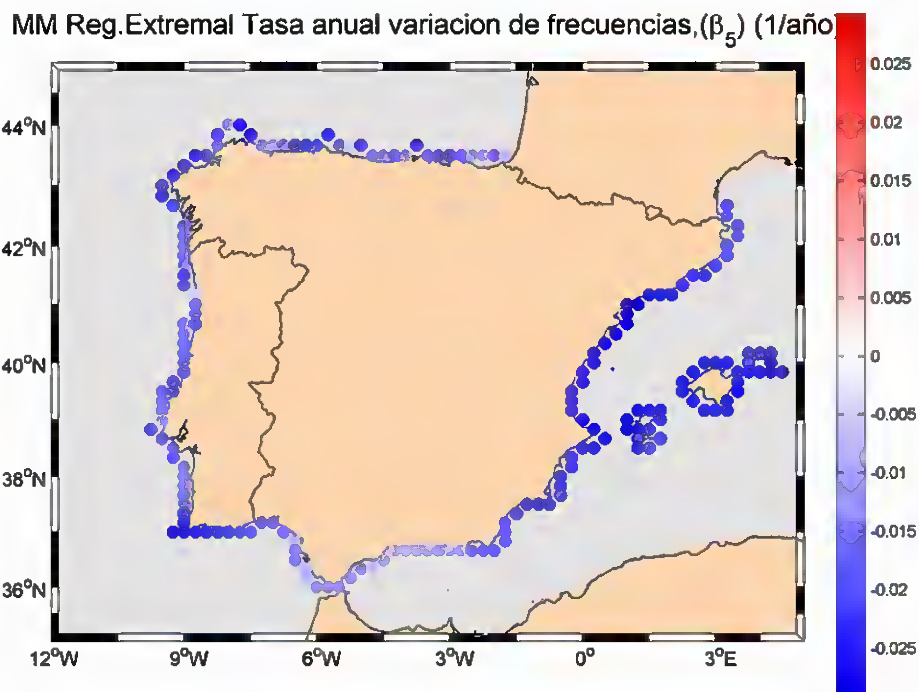


Figura 3.2 Variaciones en la ocurrencia de sucesos extremales de la marea meteorológica durante el periodo 1958-2001.

### 3.3 Régimen extremal de marea meteorológica: intensidades

Acorde con los resultados de  $H_{T50}$ , la  $MM_{T50}$  presenta los valores mayores en la costa gallega y la costa occidental cantábrica (figura 3.3). Este hecho es totalmente razonable dados los procesos dominantes climatológicos que son los forzamientos de ambas variables. Los valores más pequeños aparecen en la costa Sur peninsular, ya que es donde el área de generación del proceso que provoca residuos en la marea es menor.





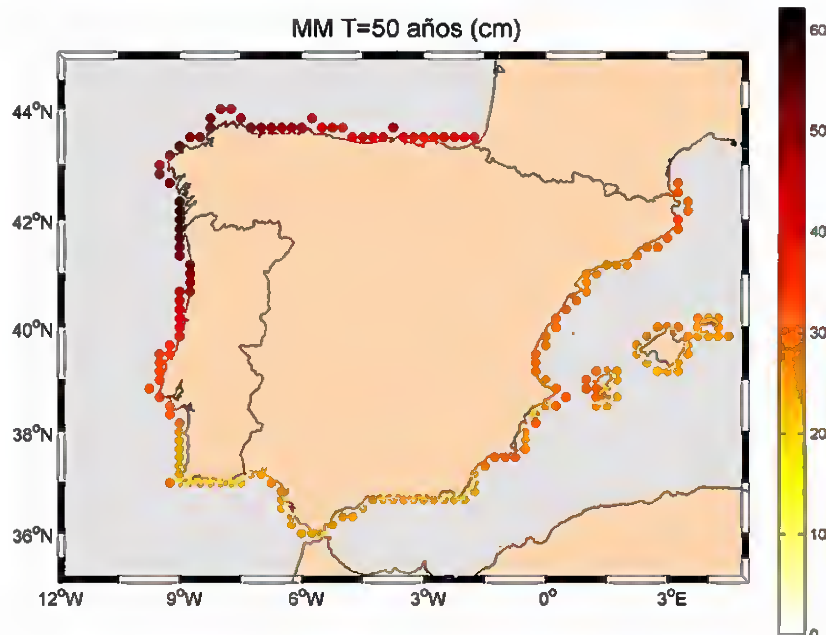


Figura 3.3 Marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno.

En general se ha producido, para todo el litoral, una disminución en la intensidad del régimen extremal de marea meteorológica. A destacar la zona de Galicia, con una disminución de hasta 7 cm en 44 años en la zona de Galicia (aproximadamente, un 10% de la marea meteorológica de 50 años de período de retorno) y la costa mediterránea, con un descenso del orden de los 3-4 cm en 44 años.



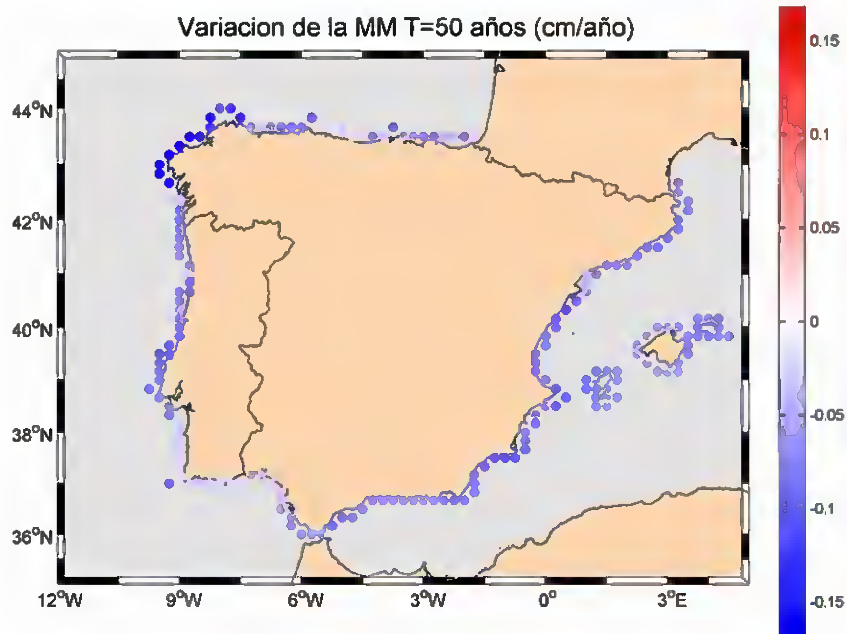


Figura 3.4 Variación de la marea meteorológica de 50 años de periodo de retorno.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO**

---

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA VIENTO

### 4.1 Régimen medio de viento

Las velocidades del viento medias que afectan al litoral español (ver figura 4.1) se encuentran zonificadas de la siguiente manera: las intensidades de mayor magnitud ( $\approx 20$  Km/h) se dan en la costa occidental peninsular, Golfo de Cádiz, Galicia y la costa occidental de Asturias, en las islas Canarias y Baleares, siendo de mayor magnitud en Galicia y Canarias. La región oriental peninsular recibe un viento medio menor, en torno a 10 Km/h.

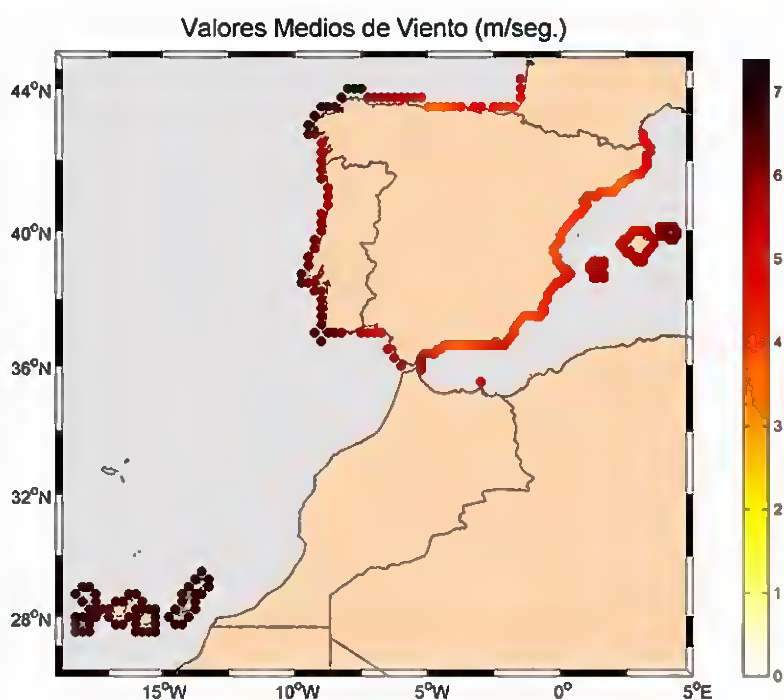


Figura 4.1 Velocidades del viento medias durante el periodo 1958-2001.

Las variaciones registradas (figura 4.2) indican una reducción generalizada de la velocidad media del viento. Sin embargo, esta disminución no supera los 3 Km/h en 40 años, para los casos más extremos (la Costa Brava y litoral Noreste de Canarias), por lo que estas variaciones son relativamente pequeñas.



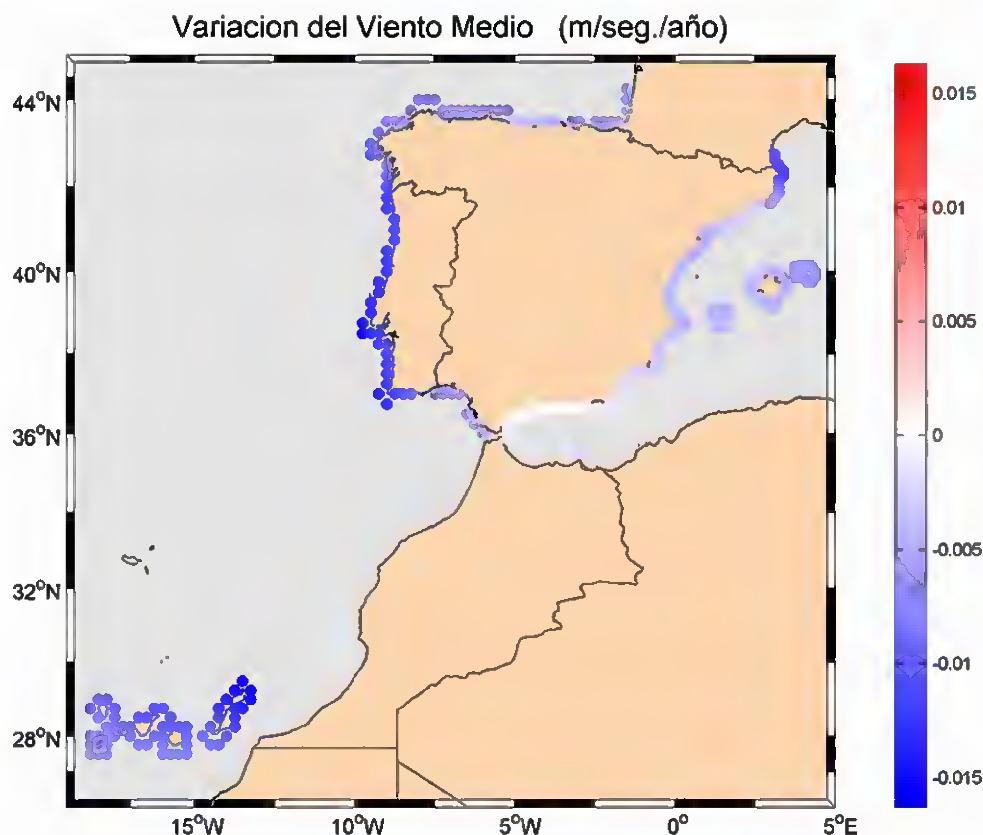


Figura 4.2. Variación del viento medio durante el periodo 1958-2001.

## 4.2 Dirección del transporte potencial eólico

En la figura 4.3 se observa que la dirección del viento predominante es, principalmente de dos tipos: viento de componente Oeste (entre 225° y 315°) y viento de componente Norte (entre 315° y 45°). Los vientos de componente Oeste se dan en la costa atlántica peninsular, denominados “Gallego” y “Galerna” en la costa cantábrica y “Poniente” en el Golfo de Cádiz. Entre los vientos de componente Norte cabe destacar el viento de “Tramontana” en Menorca y la costa Brava. Es importante señalar en este apartado que las variaciones de la dirección predominante de vientos no están suficientemente caracterizadas debido a la resolución temporal del modelo meteorológico forzador de los datos de viento de HIPOCAS. Por tanto la fiabilidad de estos resultados es menor que la del resto de variables analizadas.



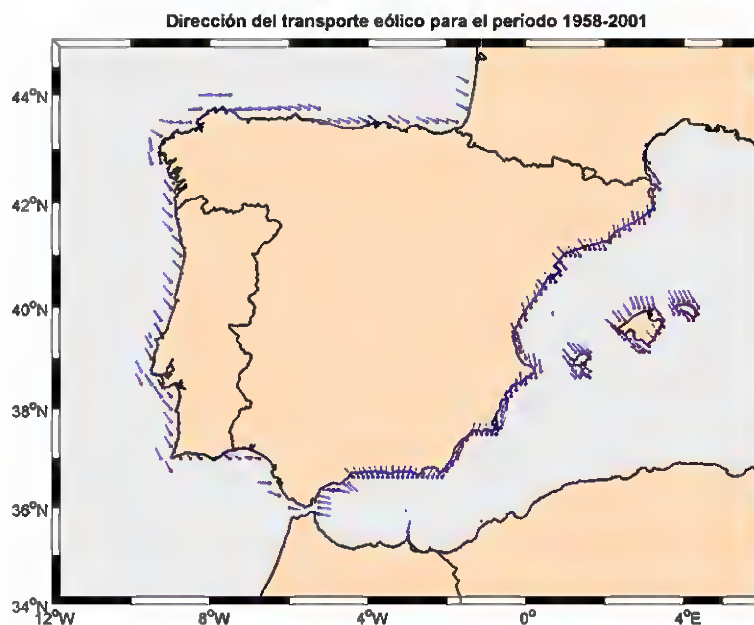


Figura 4.3 Dirección del transporte eólico durante el periodo 1958-2001.

Las principales variaciones que se detectan (figura 4.4) son un giro horario de las direcciones en la costa Sur peninsular y un giro antihorario en la costa atlántica Norte, especialmente entre Estaca de Bares y Finisterre.



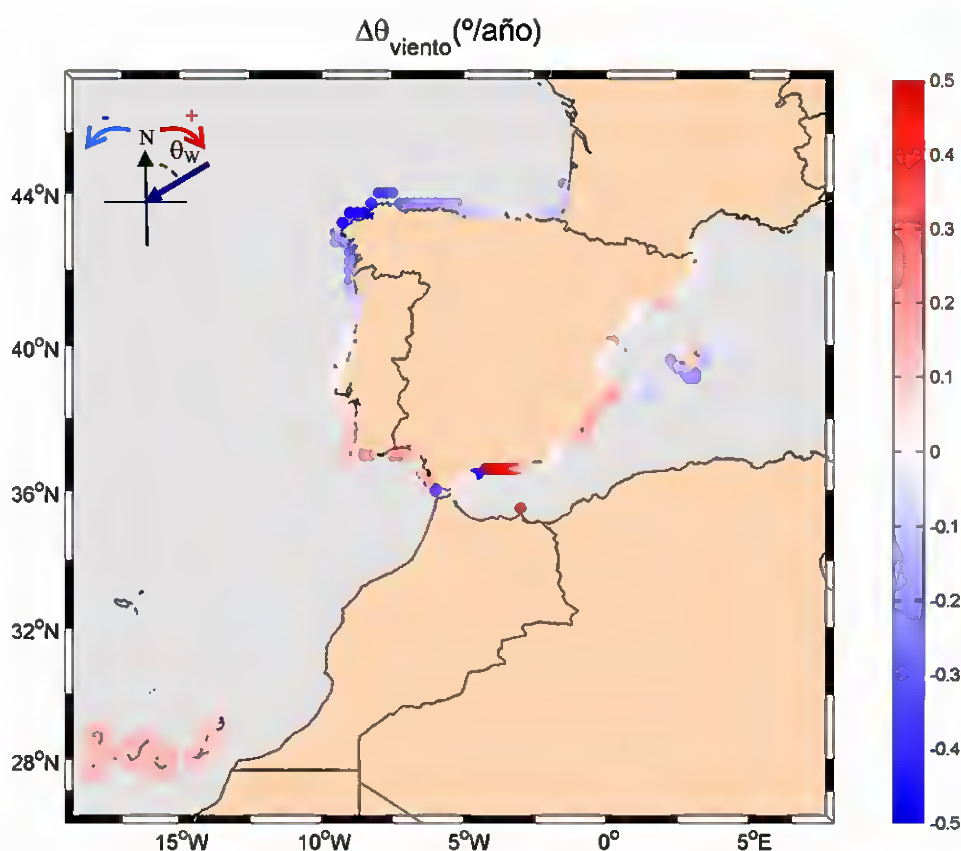


Figura 4.4 Variación de la dirección del transporte eólico durante el periodo 1958-2001.

### 4.3 Duraciones de excedencias de viento

Las variaciones de duraciones de excedencia de viento influyen en distintos aspectos del litoral español, por ejemplo en las maniobras portuarias o en el uso de las playas. Las variaciones detectadas para el caso de duraciones de excedencia de viento (figura 4.5) indican un decremento leve ( $\approx 2$  horas en 44 años) a lo largo de la costa mediterránea y un descenso importante en la Costa Brava, tanto de la duración media, como máxima que supera un umbral del percentil del 98 %. La grafica de la parte derecha indica la variabilidad en la frecuencia de estas duraciones. Se aprecia un descenso de la frecuencia de estos sucesos en Canarias, el Golfo de Cádiz y la costa oriental cantábrica.



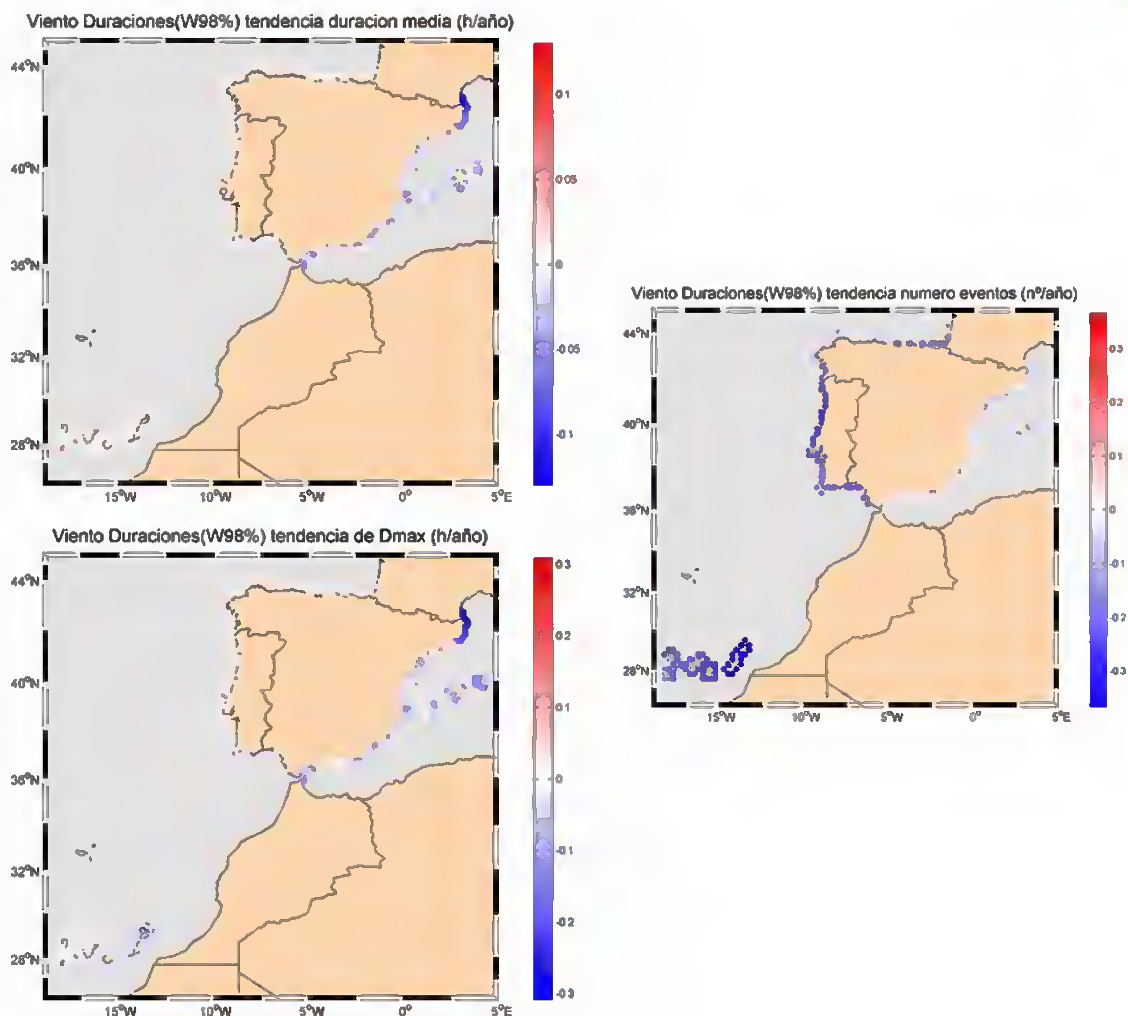


Figura 4.5. Resultados del análisis de tendencias de duraciones de excedencia de viento durante el periodo 1958-2001.

#### 4.4 Régimen extremal de viento: frecuencias

Se ha producido una importante disminución de la tasa de ocurrencia de sucesos extremos en la costa occidental peninsular y Canarias (ver figura 4.6), exceptuando la costa occidental asturiana, donde el número de sucesos extremos aumenta. En el Mediterráneo las variaciones son mínimas. Como en el caso de oleaje, los eventos extremos son sucesos independientes que superan el umbral del 95 %.





Viento Reg.Extremal Tasa anual de variacion de frecuencias, ( $\beta_5$ ) (1/año)

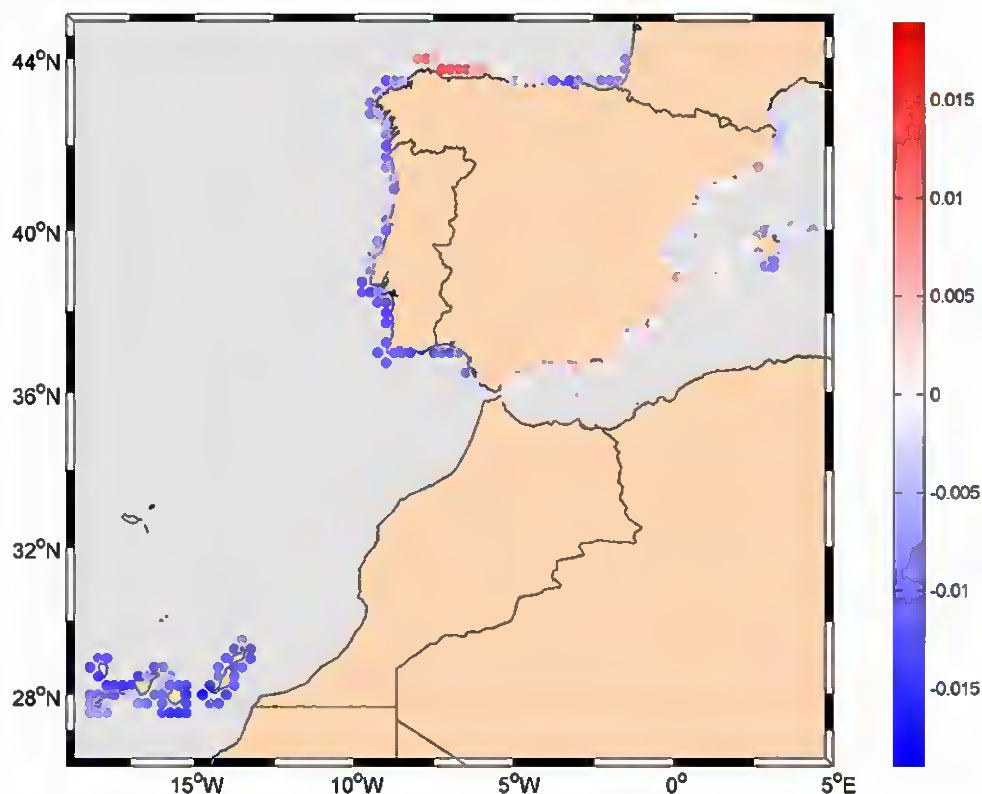


Figura 4.6 Variación de la ocurrencia de eventos extremos de viento durante el periodo 1958-2001.

#### 4.5 Régimen extremal de viento: intensidades

Los vientos de periodo de retorno de 50 años de mayor magnitud se localizan en la costa asturiana y gallega desde Estaca de Bares hasta Finisterre (vientos en torno a 100 Km/h), seguidos en magnitud del  $W_{T50}$  del Golfo de Cádiz y Baleares. A lo largo de la costa Mediterránea el  $W_{T50}$  presenta gran uniformidad y no alcanza los 70 Km/h (ver figura 4.7).



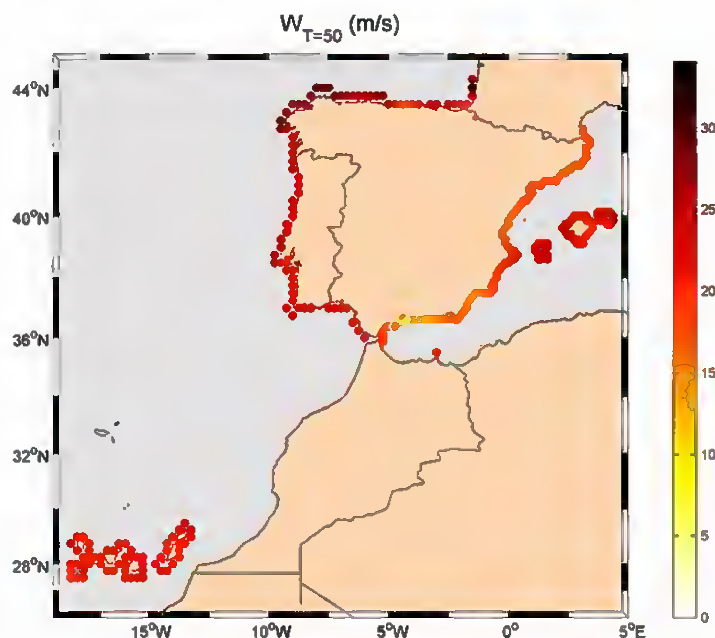


Figura 4.7 Velocidad del viento de 50 años de período de retorno.

Las variaciones de viento extremal que se han producido (figura 4.8) son relativamente reducidas (la máxima tendencia de cambio obtenida indica una variación de 7 Km/h en 44 años para el  $W_{T50}$ ). Entre estas variaciones de pequeña magnitud, cabe destacar la disminución en las Islas Canarias, Golfo de Cádiz, costa Oeste de Galicia y costa cantábrica oriental. En la costa Norte de Galicia y occidental de Asturias se produce un aumento, mientras que a lo largo de la costa mediterránea las variaciones son mínimas.



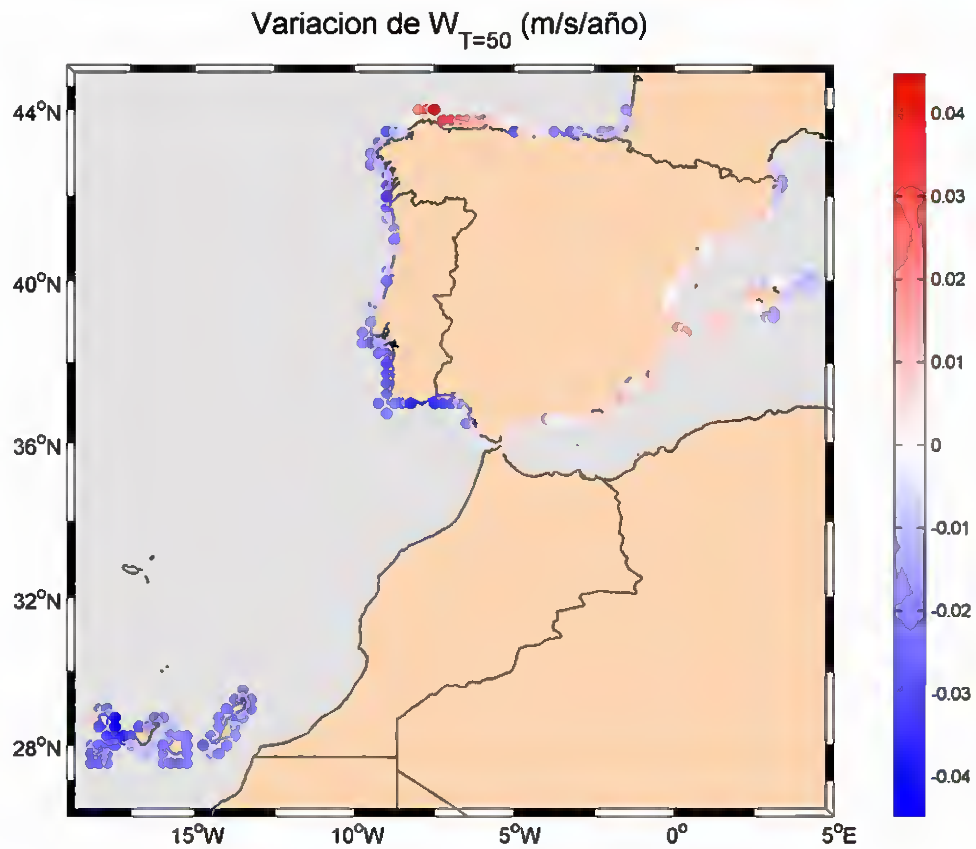


Figura 4.8 Variación de la velocidad del viento de 50 años de periodo de retorno para el periodo de 1958-2001.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA  
NIVEL MEDIO DEL MAR**

---

## 5. VARIACION DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

Si se observa en la figura 5.1 las predicciones del IPCC en el año 2050, para los distintos escenarios de cambio climático, la incertidumbre en la predicción es menor y prácticamente todos los escenarios coinciden en su valor medio en el entorno de +0.15m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25m. Por tanto, el valor de ascenso del nivel medio del mar que se ha considerado es de +0.2 m y constante para todas las zonas del litoral español. Lógicamente, en aquellos elementos del litoral afectados por subsidencia, el ascenso relativo del nivel del mar puede ser incluso mayor (por ejemplo, el delta del Ebro).

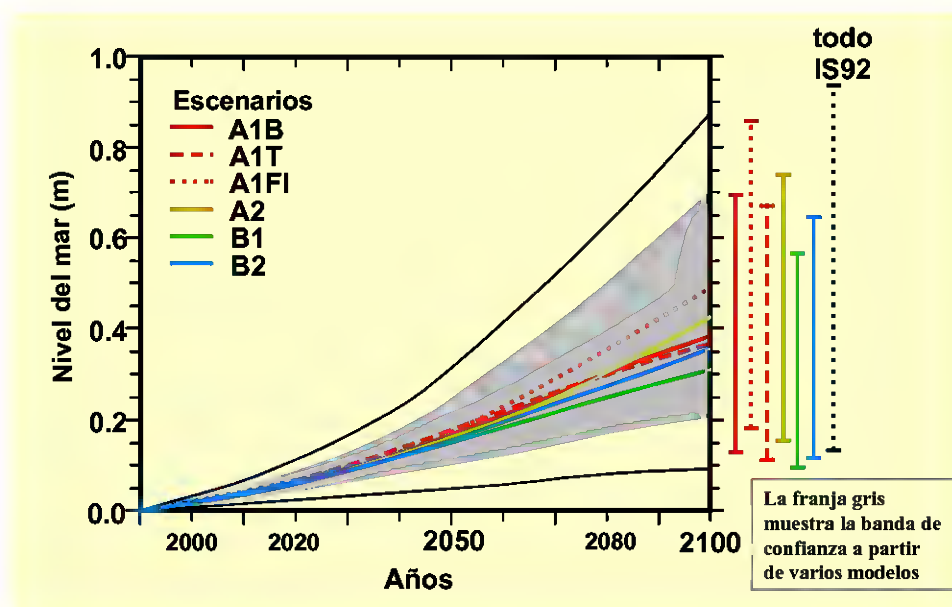


Figura 5.1. Escenarios de subida del nivel medio del mar (IPCC, 2001)

Por otro lado, cabe señalar que la tendencia actual de variación del nivel medio que se ha obtenido (Marcos et al., 2004) es de 2.5 mm/año (entre 1 y 2 mm/año para el IPCC), por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 m. Esta extrapolación no tiene en cuenta ninguna variación de largo plazo de los factores que condicionan la variación del nivel del mar, pero aún así el valor obtenido de +0.125 m está dentro del orden de magnitud de la variación predicha por los distintos escenarios.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

---



**FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN  
LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

**CAPÍTULO 6. RESUMEN DE RESULTADOS**

---



## 6. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación se describe, de forma global, la información conjunta más relevante. En el caso de oleaje, nivel del mar y velocidad del viento se destacan los resultados obtenidos para aquellas zonas donde se observa una variación a largo plazo destacable.

### ***Nivel medio del mar en el litoral español:***

A nivel global se asume que la tendencia actual de variación del nivel medio del mar en el litoral español es de 2.5 mm/año, por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 m. Esta información ha sido complementada con los modelos globales contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe, que establecen una variación del nivel del mar comprendida entre 9 y 88 cm en el intervalo correspondiente a 1990-2100. En este informe, el valor medio de los escenarios presentados oscila entorno de +0.15 m, con una banda de confianza entre +0.1m y +0.25 m. En base a estos resultados, se asume en el año horizonte 2050, un ascenso del nivel del mar de +0.2 m en el litoral español.

### ***Costa Cantábrica:***

Se observa un aumento de la energía del oleaje que llega a la Costa Cantábrica. Este aumento es mayor para la rama alta de régimen medio ( $H_{s12}$ ), sin embargo, la magnitud del incremento es menor para los sucesos más extremos ( $H_{T50}$ ). Este comportamiento produce una leve tendencia positiva en las duraciones de excedencia de alturas de ola. La dirección predominante del oleaje tiende a ser más del Oeste, con mayor intensidad en la costa occidental. Las tendencias que se obtienen para las variables de viento y marea meteorológica, tanto de régimen medio como extremal, son negativas exceptuando el viento extremal en la costa Oeste de Asturias, donde se produce un incremento. Aún así, estas últimas variaciones son mínimas.

### ***Galicia:***

En la costa Gallega se observa una zonación importante en la magnitud de las variables de estudio y sus tendencias marcadas por el cabo Finisterre, lo que genera un clima marítimo más suave en las Rías Bajas. La energía del oleaje tiende a aumentar, especialmente para los eventos extremos, entre Estaca de Bares y Finisterre.





### **Costa Mediterránea:**

No se aprecian cambios relevantes en la magnitud de la energía del oleaje, aunque sí destacables peculiaridades en Cabo de la Nao, debidas a su situación geográfica, y en la Costa Brava, dada su cercanía al Golfo de León. Las duraciones de excedencia de altura de ola estimadas tienden a aumentar ligeramente a lo largo de la costa, lo que implica una disminución de la operatividad de los puertos. En la Costa Brava, donde se detectan tendencias con un comportamiento similar al Noreste Balear, se observa una disminución energética del oleaje medio. Respecto a la dirección predominante del oleaje, se han producido variaciones en las Islas Baleares y en la Costa Brava se ha detectado una tendencia de giro horario en los oleajes, de forma que la dirección predominante tiende a ser más oriental.

El régimen medio del viento y marea meteorológica presenta una tendencia negativa, pero de muy pequeña escala. Es importante destacar la gran significancia estadística que aportan los resultados de tendencia negativa de marea meteorológica en el Mediterráneo, Baleares y costa Noroeste gallega, a pesar de ser sus variaciones muy pequeñas.

### **Golfo de Cádiz:**

El Golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa muy clara en energía del oleaje para todas las variables de oleaje estudiadas, lo que confirma la tendencia a un clima marítimo más suave.

### **Canarias:**

Se detecta una zonación Norte-Sur clara en la tendencia de cambio de los temporales. Este hecho se explica dada la distinta naturaleza de generación de oleaje en el Norte (oleajes generados en el Atlántico Norte con un Fetch de generación muy extenso), respecto al Sur (oleajes generados en un área más próxima al archipiélago). Los resultados de variación a largo plazo indican que se ha producido un incremento de los temporales en el Norte y una tendencia a la disminución energética y giro horario de las direcciones del oleaje en el Sur.

A continuación se presenta, de forma agregada, los resultados obtenidos para las principales variables analizadas en distintas áreas geomorfológicas del litoral español. Considerando 12 áreas, relativamente homogéneas, se ha representado el valor medio, máximo y mínimo, así como su principal variación obtenida. En la gráfica 6.1 se exponen los resultados de régimen medio y en la gráfica 6.2 para el régimen extremal.





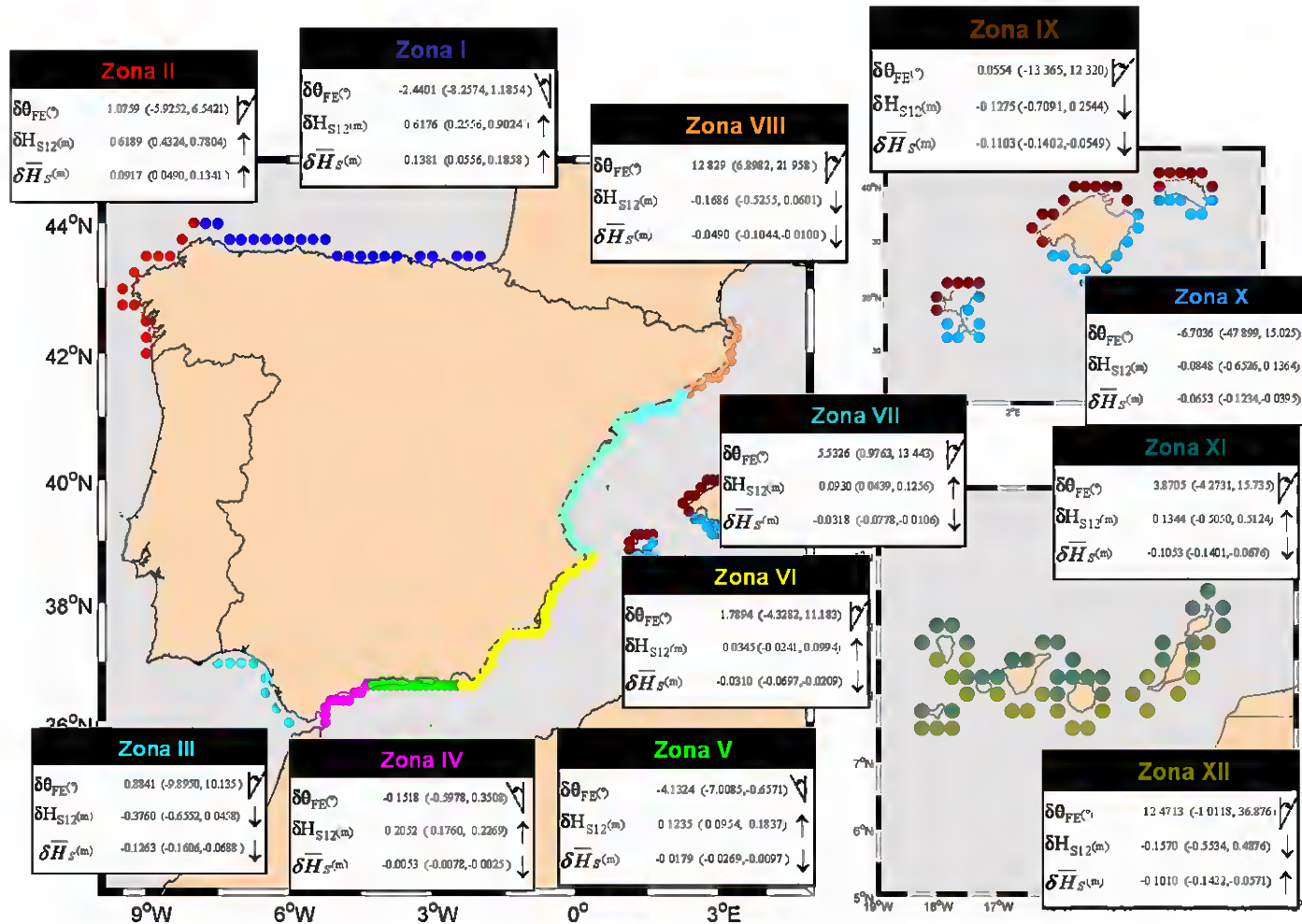


Figura 6.1 Variaciones obtenidas para las variables de régimen medio durante el periodo 1958-2001.



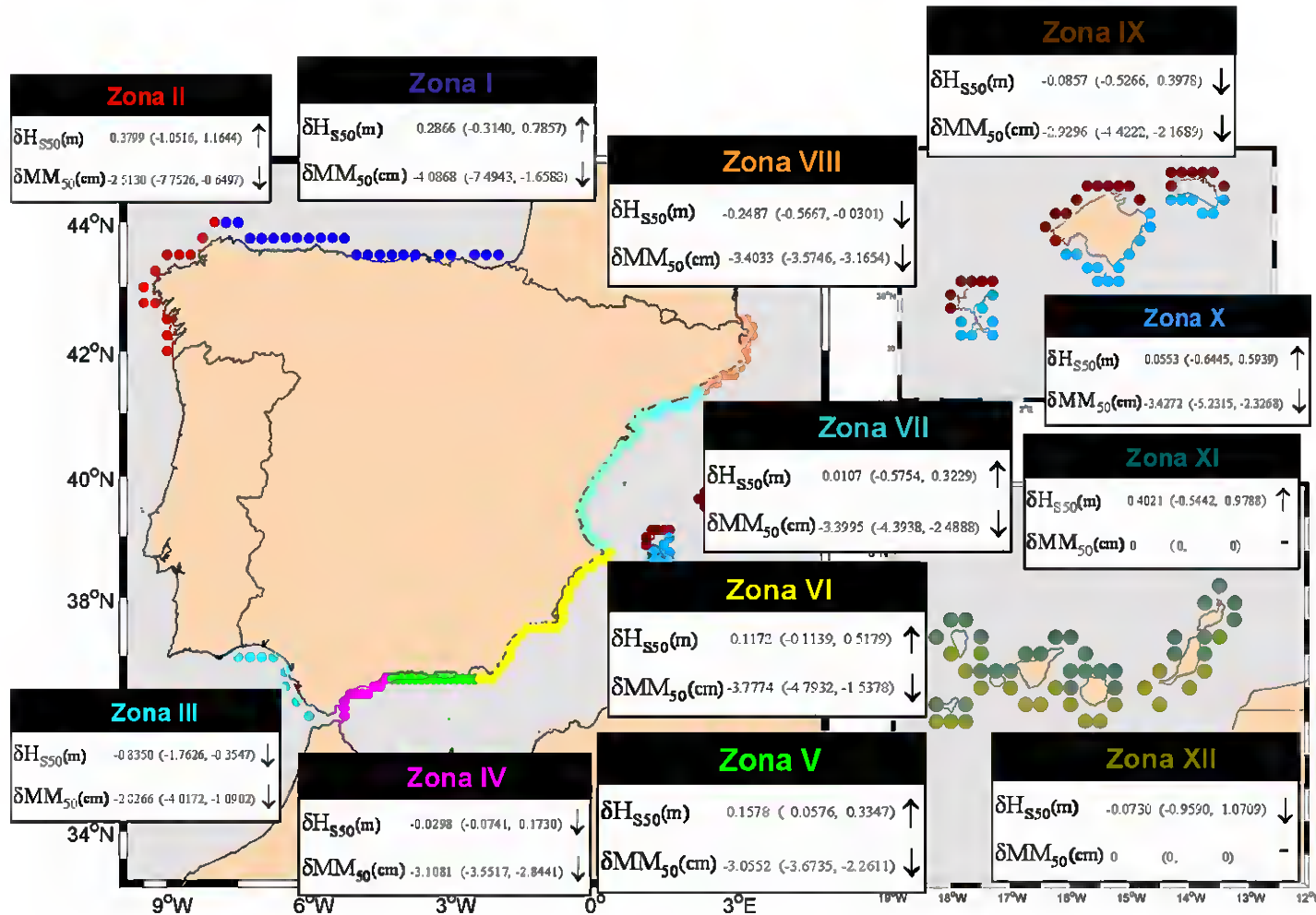
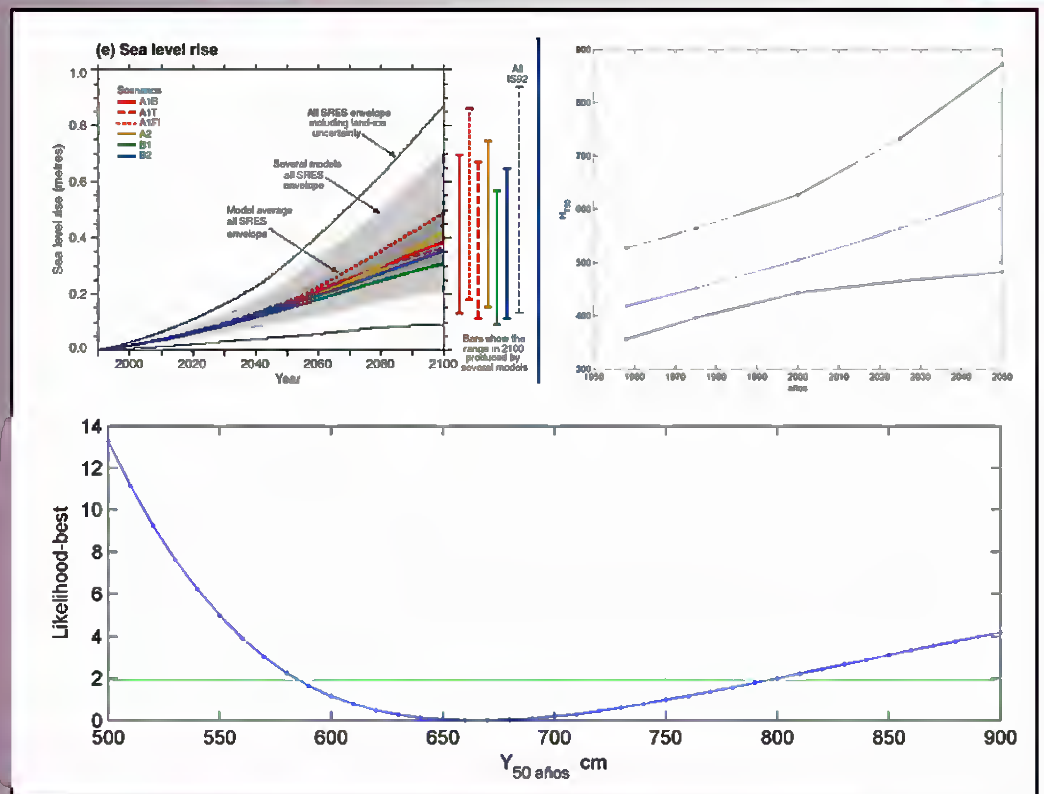


Figura 6.2 Variaciones obtenidas para las variables de régimen extremal durante el periodo 1958-2001.



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



## FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA PARA ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Fase I-d) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

### **FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

### **FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

### **FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsible cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.







**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Fase I-d:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Fase I-d. Prognosis de cambio en la dinámica costera a lo largo del siglo XXI.**





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**ÍNDICE**

---

## Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	I.1
Capítulo 2. EXTRAPOLACIÓN DE LA SERIE DE HIPOCAS (1958-2001) AL AÑO 2050.....	2.1
Capítulo 3. PROGNOSIS DE CAMBIO DE NIVEL DEL MAR .....	3.1
Capítulo 4. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LOS CAMBIOS DE OLEAJE PARA POSIBLES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	4.1
4.1. Introducción.....	4.1
4.2. Modelos de generación de oleaje .....	4.1
4.3. Correlaciones entre campos espacio-temporales de oleaje y campos espacio-temporales de presiones .....	4.3
4.4. Correlaciones puntuales entre oleaje y viento .....	4.5
4.5. Discusión sobre las metodologías .....	4.8
4.6. Resultados de “north atlantic ocean wave climate change scenarios for the 21st century” (Wang et. al., 2004).....	4.9
4.6.1. Metodología.....	4.9
4.6.2. Variaciones de régimen medio .....	4.11
4.6.3. Variaciones de régimen extremal .....	4.14
4.6.4. Conclusiones.....	4.16
Capítulo 5. ANÁLISIS DE PROGNOSIS DE CAMBIO DE CAUDAL FLUVIAL Y SEDIMENTO.....	5.1
5.1. Variación del caudal fluvial .....	5.1
5.2. Variación del caudal de sedimento.....	5.4
Capítulo 6. REFERENCIAS .....	6.1



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---



## 1. INTRODUCCIÓN

El clima de la tierra está constantemente cambiando. Además de las variaciones naturales, el clima futuro está afectado por las emisiones antropogénicas de los gases que potencian el efecto invernadero y aerosoles. Los océanos son una importante componente del sistema climático global, por lo que es esperable que los regímenes medio y extremal de clima marítimo se vean afectados por el forzamiento antropogénico del clima.

Para realizar el estudio de la prognosis de cambio en la dinámica costera a lo largo del siglo XXI, se debe analizar las tendencias de los agentes forzadores del litoral; esto es, los cambios en el nivel medio del mar, en el clima marítimo y en la dinámica sedimentaria. Los dos tipos de análisis de extrapolación que se pueden realizar para responder a las preguntas de ¿qué pasará en el *año horizonte 2050*? ¿y en el año 2100? (ver figura 1.1) consisten en:

X (cualquier parametro)

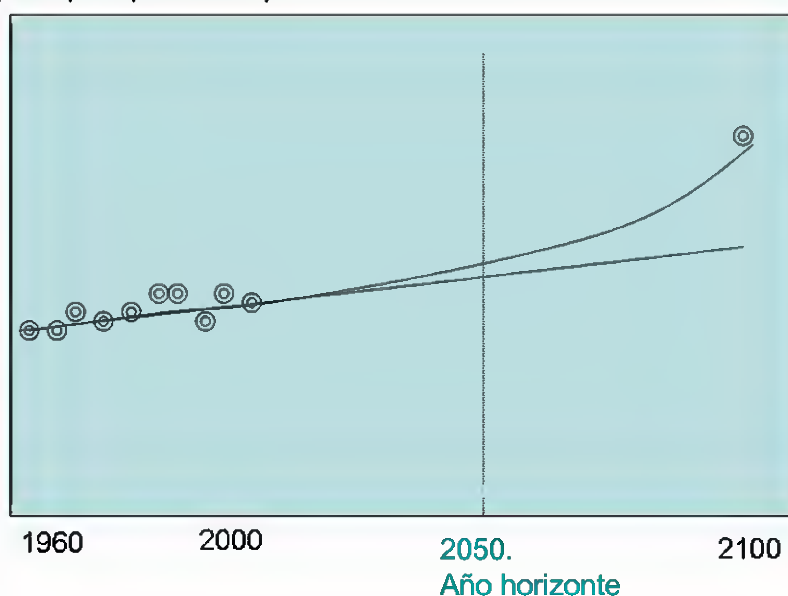


Figura 1.1. Esquema de extrapolación al año horizonte 2050 y prognosis para el año horizonte 2100

- (a) Apoyarse en las tendencias históricas a lo largo del siglo XX, para poder realizar una extrapolación de los cambios a un año horizonte (en este estudio se ha considerado como horizonte el año 2050). Para el primer tipo de análisis (tendencias históricas a lo largo del siglo XX), es claro que cuanto mayor sea la serie histórica, mayor será la fiabilidad (significación estadística) de la predicción de la tendencia. Para ello, es necesario disponer de bases de datos de al menos 40-50 años, para poder predecir con





alguna garantía de éxito para el año horizonte 2050. Es importante señalar que esta extrapolación asume que la tendencia de variación de las variables geofísicas es constante hasta el año horizonte, con lo cual se está asumiendo que las emisiones de gases de efecto invernadero no aumentan.

- (b) Realizar prognosis de cambio (en principio para el horizonte del año 2100) para distintos escenarios de cambio climático contemplados en el tercer informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (ver figura 1.2, IPCC, 2000). En estos últimos años, se están desarrollando nuevas herramientas capaces de pronosticar las respuestas del sistema climático ante diferentes escenarios de emisiones antropogénicas. Así, evaluando la diferencia en el clima de cada uno de los posibles escenarios futuros y el del escenario actual, se puede cuantificar el cambio climático que previsiblemente se experimentará para cada escenario. Con estos escenarios se representa el cambio climático, tanto el debido a la incidencia de los humanos como el debido a la variabilidad natural del clima.

En este documento se presentan los estudios que se han desarrollado y los que se han recogido del estado de conocimiento para realizar la prognosis de evolución del clima marítimo, del nivel del mar y de la dinámica fluvial y sedimentaria.

En cuanto a la prognosis de evolución del clima marítimo, en la sección 2 se presenta una metodología para extrapolar las tendencias obtenidas en la Fase Ib al año horizonte 2050; obteniendo tanto los valores medios de la variación como las bandas de confianza. En la sección 3 se presentan los resultados de prognosis de variación del nivel del mar para el siglo XXI. La sección 4 discute distintas metodologías para estimar, bajo distintos escenarios de cambio climático, las variaciones de los regímenes medio y extremal de clima marítimo. En esta sección se presentan los resultados obtenidos por diversos centros de investigación. Finalmente, en la sección 5 se presenta el análisis de prognosis de evolución para el siglo XXI de la dinámica fluvial y la dinámica sedimentaria.



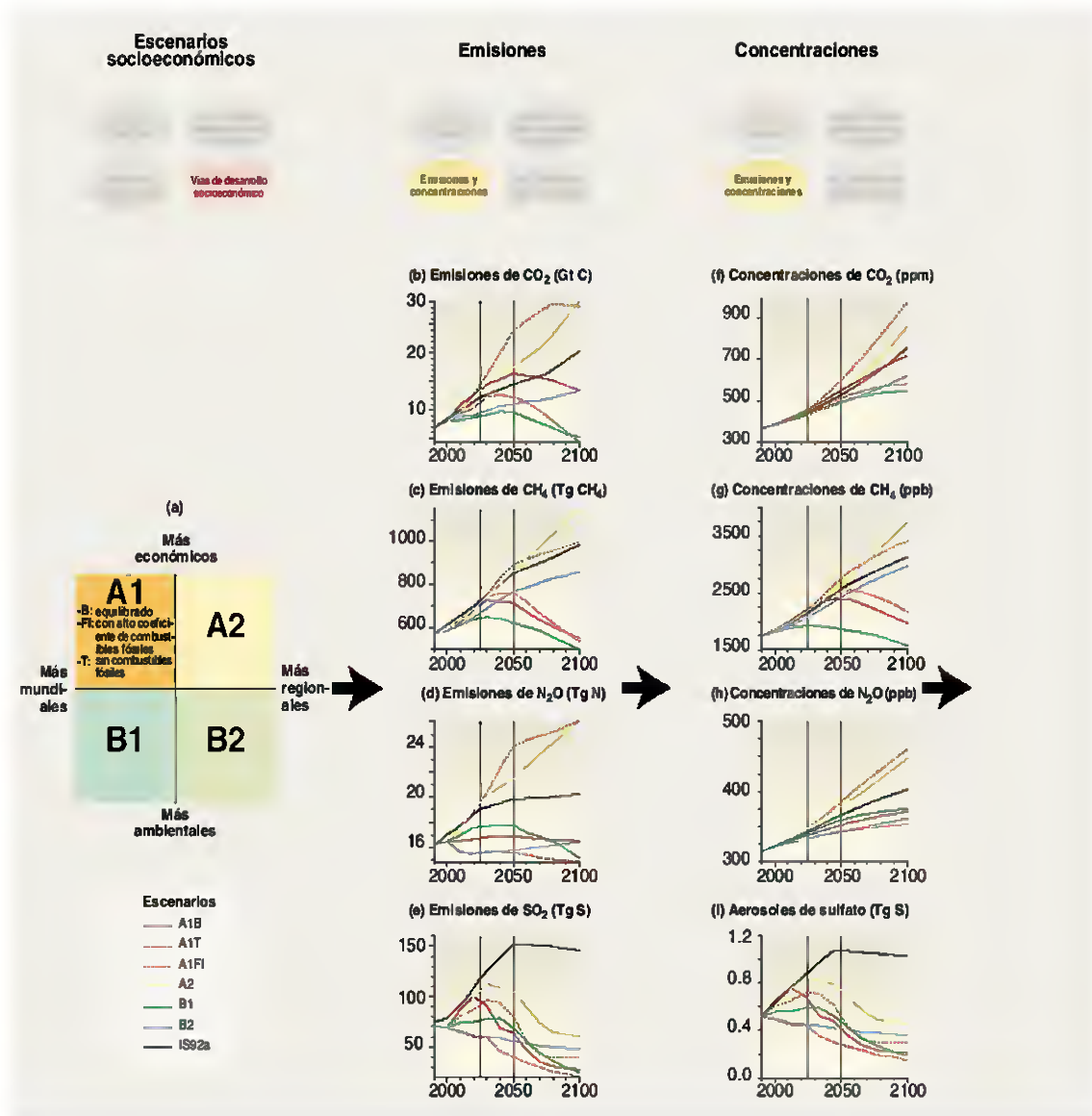


Figura 1.2. Evolución de las emisiones y concentraciones para los distintos escenarios (IPCC, 2000)



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 2. EXTRAPOLACIÓN DE LA SERIE DE HIPOCAS  
(1958-2001) AL AÑO 2050**

---



## 2. EXTRAPOLACIÓN DE LA SERIE DE HIPOCAS (1958-2001) AL AÑO 2050

Para poder estimar las variaciones futuras en el clima marítimo hasta el año horizonte 2050, se han utilizado los resultados obtenidos del análisis de tendencias del clima marítimo de la base de datos HIPOCAS (1958-2001), caracterizado por altura de ola, marea meteorológica y velocidad del viento, para extrapolar la información obtenida a un escenario futuro.

Este planteamiento consiste en proyectar hacia etapas posteriores los resultados de tendencia a largo plazo obtenidos de la base de datos desde 1958 hasta el año 2001. De esta forma, se podrán obtener resultados muy útiles de cambio, ya que la etapa temporal a predecir es la más próxima a la situación actual. El problema planteado es hasta dónde se pueden extrapolar las tendencias obtenidas. Para solucionar esta cuestión se ha realizado una extrapolación de los resultados de cambio y sus bandas de confianza para los años sucesivos. La extrapolación realizada consiste en obtener la variable de estudio de 50 años de retorno y su banda de confianza del 95%, para distintos años de la base de datos y para los años sucesivos. Comparando el comportamiento de las bandas de confianza a lo largo del tiempo se puede calcular hasta qué tiempo tiene sentido realizar una predicción.

A modo de ejemplo, la variable de  $n$  años de retorno vendrá descrita por la expresión:

$$y_n(t) = \mu(t) + \psi(t) \cdot \frac{n^{\hat{\xi}} - 1}{\hat{\xi}}$$

$$\text{donde: } \begin{cases} \mu(t) = \left[ \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot \text{sen}(kt) + \hat{\beta}_2 \cos(kt) + \hat{\beta}_3 \text{sen}(2kt) + \hat{\beta}_4 \cos(2kt) \right] \cdot e^{\hat{\beta}_5 t} \\ \psi(t) = \hat{\alpha}_\psi \cdot \mu(t) \end{cases}$$

Para obtener  $y_n(t)$  y su variación en el tiempo, se ha realizado el cambio de variable:

$$\beta_0 = \left[ \hat{y}_n / \left( 1 + \hat{\alpha}_\psi \cdot \frac{n^{\hat{\xi}} - 1}{\hat{\xi}} \right) \right] \cdot e^{-\hat{\beta}_5 t} - \left( \hat{\beta}_1 \cdot \text{sen}(kt) + \hat{\beta}_2 \cos(kt) + \hat{\beta}_3 \text{sen}(2kt) + \hat{\beta}_4 \cos(2kt) \right)$$

Los intervalos de confianza para cada año se realizan mediante el método estadístico denominado “likelihood profile”. El método likelihood profile se basa en la siguiente relación para estimar el intervalo de confianza de probabilidad  $100-x\%$ , fijando el valor de  $p$  parámetros del modelo:







$$\ln L - \ln L_{MLE} = 0.5 \chi^2(p, x/100)$$

donde  $L$  es la función maximizada mediante el método de máxima verosimilitud,  $L_{MLE}$  es la función maximizada fijando un determinado numero de parámetros,  $p$ , y  $\chi^2$  es la función estadística Chi-cuadrado. Para un parámetro ( $p=1$ ) y para un intervalo de confianza del 95% resulta:  $\frac{1}{2} \chi^2(1, 0.05) = 1.9207$  (ver ejemplo de  $H_{T50}$  en Mahón para el año 2010, en la figura 2.1).

A modo de ejemplo para la variable de 50 años de periodo de retorno, el valor óptimo obtenido para el parámetro a estudiar,  $y_{50}$ , será aquél cuyo  $\ln L - \ln L_{MLE} = 0$ . Cuanto mayor sea el valor de  $\ln L - \ln L_{MLE}$  peor será el ajuste obtenido para el  $y_{50}$  fijado. Cuanto mayor sea la curtosis de la función resultante más estrecho será el intervalo de confianza obtenido.

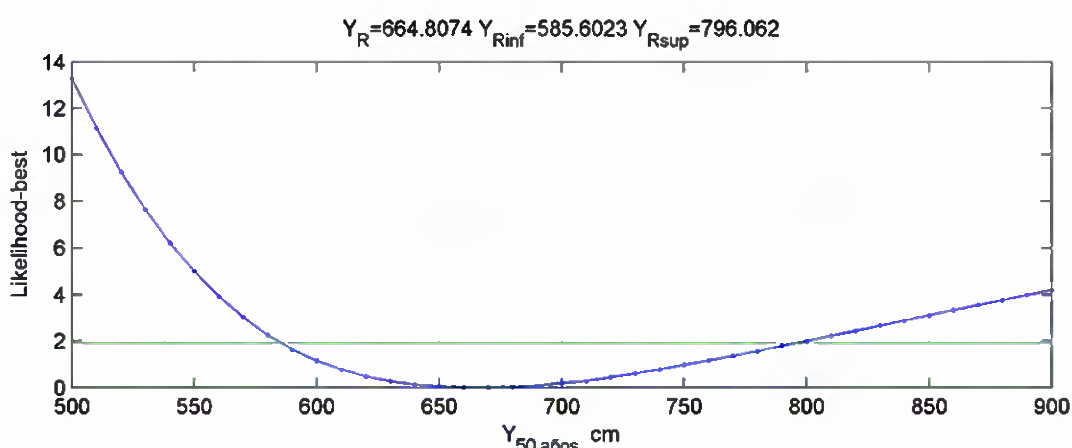


Figura 2.1. Esquema de cálculo de IC95% para  $H_{T50}$  en Mahón en el año 2010.

La evolución de las bandas de confianza estimadas se muestra en la figura 2.2, para un punto situado en las inmediaciones de Mahón, para  $H_{T50}$ .



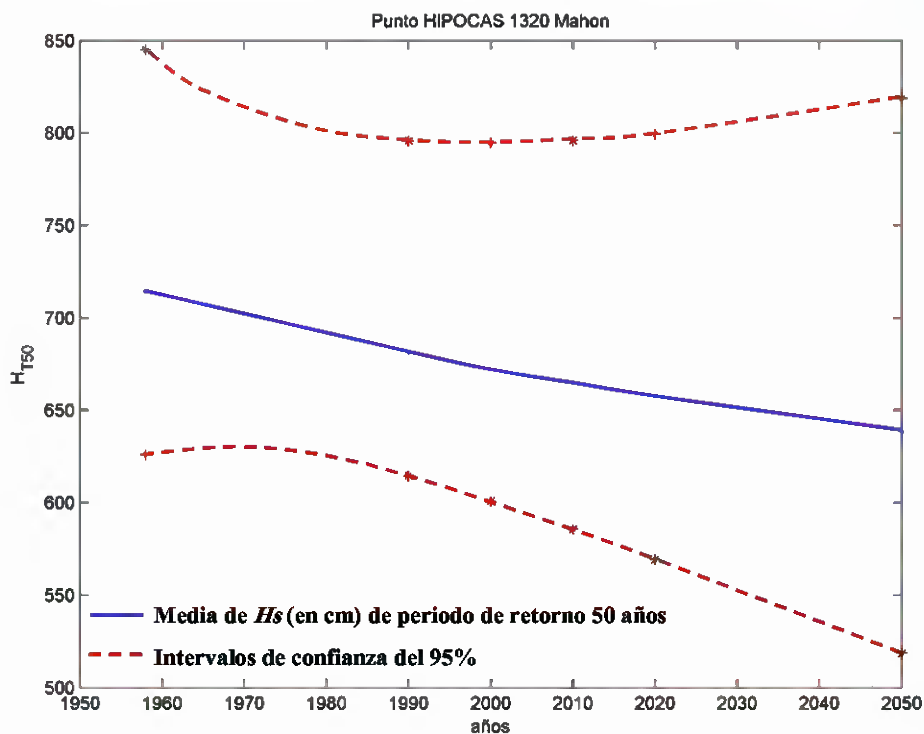


Figura 2.2. Evolución de  $H_{T50}$  y sus bandas de confianza en Mahón.

Nótese como, del año 2001 al año 2050, las bandas de confianza aumentan de manera considerable aumentando la incertidumbre del valor de la estimación.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 3. PROGNOSIS DE CAMBIO DE NIVEL DEL MAR**

---



### 3. PROGNOSIS DE CAMBIO DE NIVEL DEL MAR

En cuanto a las predicciones de variación del nivel medio del mar, se van a utilizar los resultados de los modelos globales para los distintos escenarios contemplados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su tercer informe (ver figura 3.1). En dicho informe se definen a lo largo del siglo XXI y para cada escenario, las variaciones del nivel medio del mar así como el rango de variación para cada uno de ellos. A la vista de los resultados obtenidos, se puede establecer la horquilla de variación de entre 9 y 88 cm en el intervalo desde 1990 hasta 2100. Esta gran incertidumbre en las predicciones para el año 2100 es debida a la gran variabilidad de los escenarios de desarrollo socio-económico y ambiental propuestos por el IPCC para el siglo XXI.

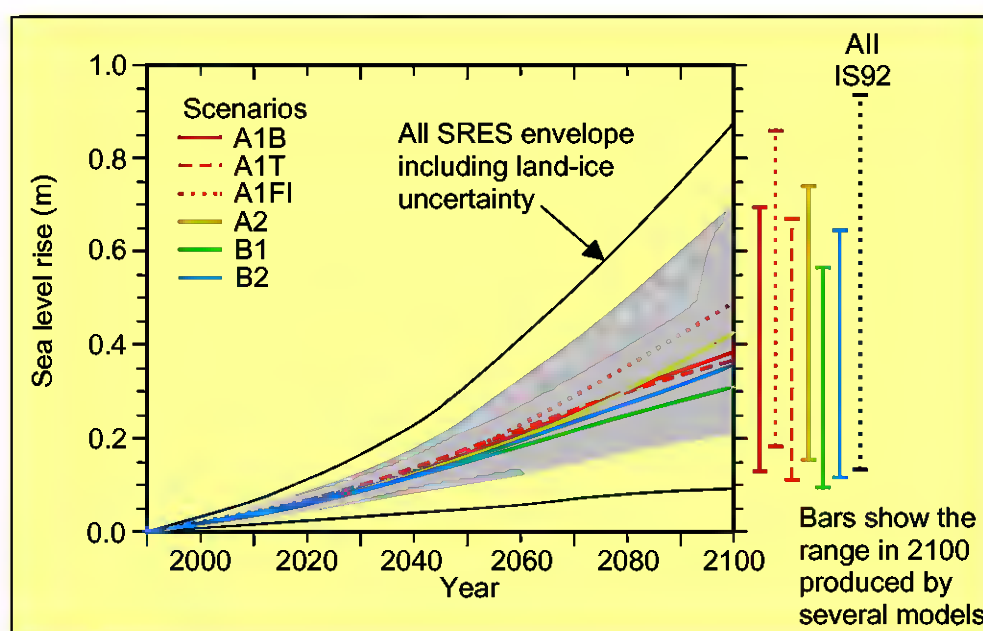


Figura 3.1. Escenarios de subida del nivel medio del mar (IPCC, 2001)

Como ya se ha comentado anteriormente, en este Proyecto se ha fijado como año horizonte el 2050. Si se observa en la figura anterior, la incertidumbre en la predicción es menor y prácticamente todos los escenarios coinciden en su valor medio en el entorno de +0.15m, con una banda de confianza entre +0.1 m y +0.25 m. En este estudio el valor de ascenso del nivel medio del mar que se ha considerado es de **+0.2 m** y constante para todas las zonas del litoral español. Lógicamente, en aquellos elementos del litoral afectados por subsidencia, el ascenso relativo del nivel del mar puede ser incluso mayor (por ejemplo, el delta del Ebro).





Por otro lado, cabe señalar que la tendencia actual de variación del nivel medio que se ha obtenido (ver Fase 1b) es de 2.5 mm/año (entre 1 y 2 mm/año para el IPCC), por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso del nivel medio de +0.125 m. Esta extrapolación no tiene en cuenta ninguna variación de los factores que condicionan la variación del nivel del mar, pero aún así el valor obtenido de +0.125 m está dentro del orden de magnitud de la variación predicha por los distintos escenarios.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 4. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR  
LOS CAMBIOS DE OLEAJE PARA POSIBLES  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

---



## 4. METODOLOGÍAS PARA ESTIMAR LOS CAMBIOS DE OLAJE PARA POSIBLES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

### 4.1. Introducción

Existen distintas herramientas utilizadas para simular las respuestas del clima marítimo, y en concreto el oleaje, ante los cambios en la composición atmosférica debido al forzamiento antropogénico. En los siguientes apartados se explican las diferentes metodologías que se pueden utilizar para estimar los cambios en el oleaje, como son los modelos de generación de oleaje, la determinación de correlaciones entre campos espacio-temporales de oleaje y campos espacio-temporales de presiones o la determinación de correlaciones puntuales entre oleaje y viento.

Entre las diversas instituciones y proyectos europeos que han estudiado los posibles cambios del oleaje para los distintos escenarios de cambio climático, se han recopilado las predicciones y conclusiones del grupo WASA (WASA, 1998), el grupo STOWASUS-2100 (STOWASUS-2100, 2001), el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), el proyecto europeo PRUDENCE (PRUDENCE, 2004), del centro de investigación GKSS (Storch & Reichard, 1997, Langenberg et. al., 1999 y Pfizenmayer & Storch, 2001) y finalmente se han utilizado los resultados del Servicio Meteorológico de Canadá (Wang et. al., 2004) para estimar los regímenes medios y extremales de altura de ola significativa ( $H_s$ ) para tres escenarios (IS92a, A2 y B2) de cambio climático.

### 4.2. Modelos de generación de oleaje

Los modelos de generación de oleaje utilizan como forzamiento datos atmosféricos obtenidos de modelos climáticos globales. El modelo numérico de generación de oleaje WAM (WAMD1, 1988) ha sido utilizado por diversas instituciones y centros de pronóstico meteorológico, como el grupo WASA (WASA, 1998) o el grupo STOWASUS-2100 (STOWASUS-2100, 2001). Por ejemplo, el grupo STOWASUS-2100 ha ejecutado la tercera generación del modelo WAM en el Atlántico Norte para dos escenarios, para el escenario de control se ejecuta el modelo WAM para el periodo 1970-1999 y para el escenario con doble concentración de CO<sub>2</sub> se ejecuta el modelo WAM para el periodo 2060-2089. En las figuras 4.1, 4.2 y 4.4 se representan los cambios entre varios parámetros de caracterización del oleaje (STOWASUS-2100, 2001), como puede observarse la zona donde se ha ejecutado el modelo no engloba a la Península Ibérica.



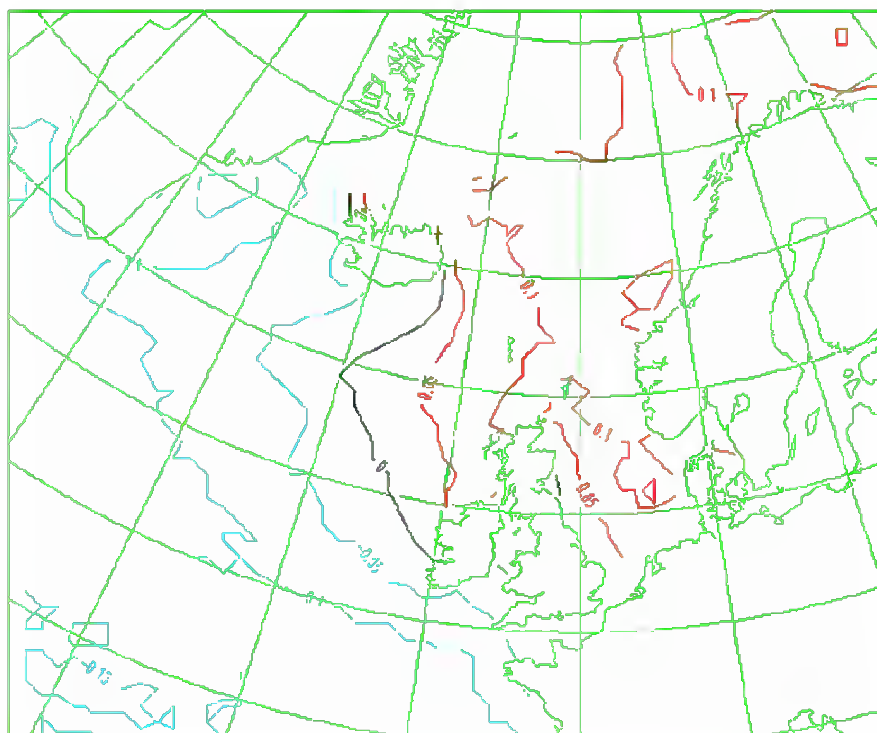


Figura 4.1. Diferencia entre la media de altura de ola significativa de la ejecución 2XCO<sub>2</sub> y la ejecución de control (en metros)

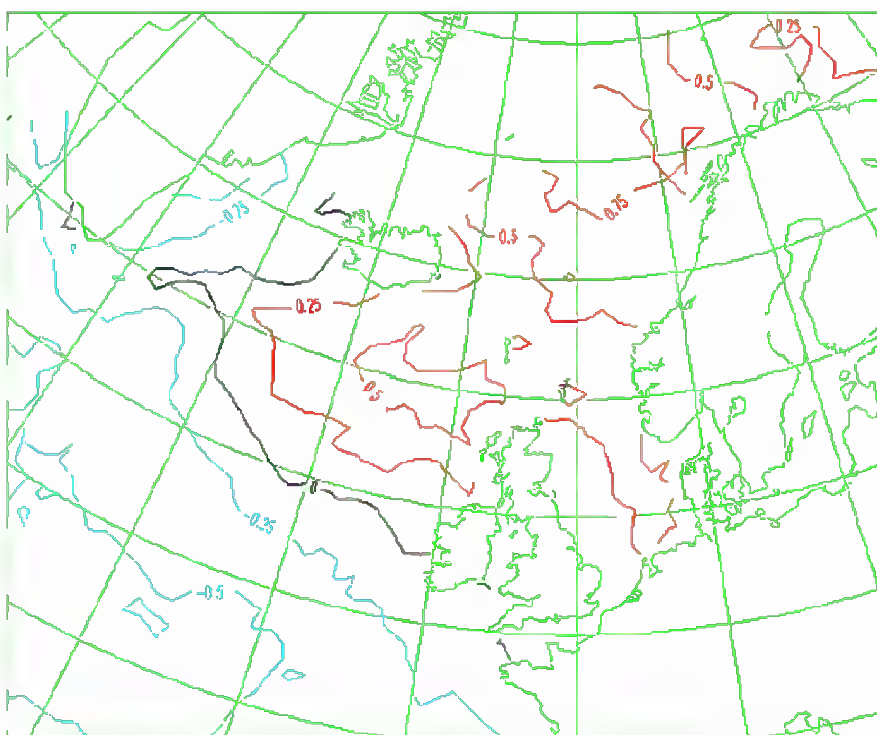


Figura 4.2. Diferencia entre el percentil del 99% de altura de ola significativa de la ejecución 2XCO<sub>2</sub> y la ejecución de control (en metros)





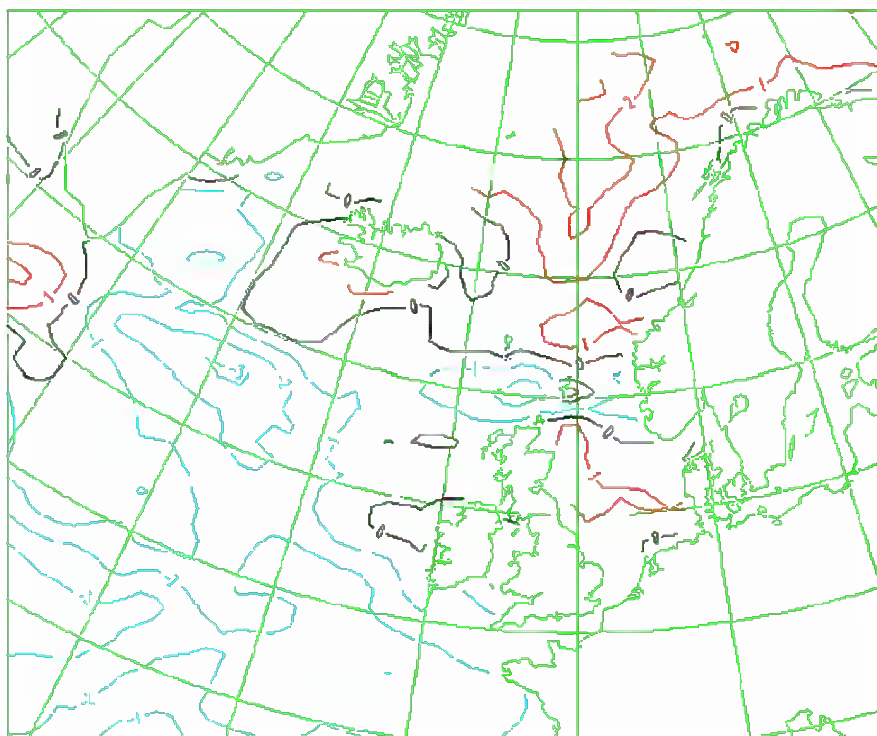


Figura 4.3. Diferencia entre la altura de ola significativa de periodo de retorno de 100 años de la ejecución 2XCO<sub>2</sub> y la ejecución de control (en metros)

Aunque los modelos globales atmosféricos son fundamentales para construir los distintos posibles escenarios futuros, el uso directo de sus resultados está limitado por diversos factores. Por ejemplo, la caracterización del clima marítimo (oleaje) necesita resoluciones no tan groseras como las utilizadas en los modelos globales. Por lo tanto, y suponiendo que el clima de una determinada región (como por ejemplo la Península Ibérica) está condicionada por el estado global de la atmósfera, los modelos regionales de generación del oleaje deben complementarse con modelos empíricos/estadísticos para realizar un “downscaling” (mejora de resolución o interpolación de una predicción de un modelo numérico efectuada en una rejilla) que permita una correcta caracterización del clima marítimo local.

### 4.3. Correlaciones entre campos espacio-temporales de oleaje y campos espacio-temporales de presiones

Existen métodos estadísticos que correlacionan distintas variables espacio-temporales, tales como el Análisis de las Correlaciones Canónicas “Canonical Correlation Analysis” (CCA) o el Análisis de las Redundancias “Redundancy Analysis” (RA). Con estos métodos lo que se trata de realizar es determinar las correlaciones entre campos de





presiones y campos de oleajes, para la situación actual. Una vez halladas estas correlaciones, y suponiendo que permanecen constantes en el tiempo, se utilizan para determinar los futuros campos de oleajes a partir de los previsible campos de presiones de los distintos escenarios.

Estos métodos estadísticos se han utilizado principalmente para correlacionar campos espacio-temporales de presión con campos espacio-temporales de nivel del mar (Storch & Reichard, 1997, Langenberg et. al., 1999; STOWASUS-2100, 2001); también se han utilizado estos métodos para determinar correlaciones entre campos espacio-temporales de presión a nivel de superficie (SLP) con campos espacio-temporales de viento (ver figura 4.4, STOWASUS-2100, 2001).

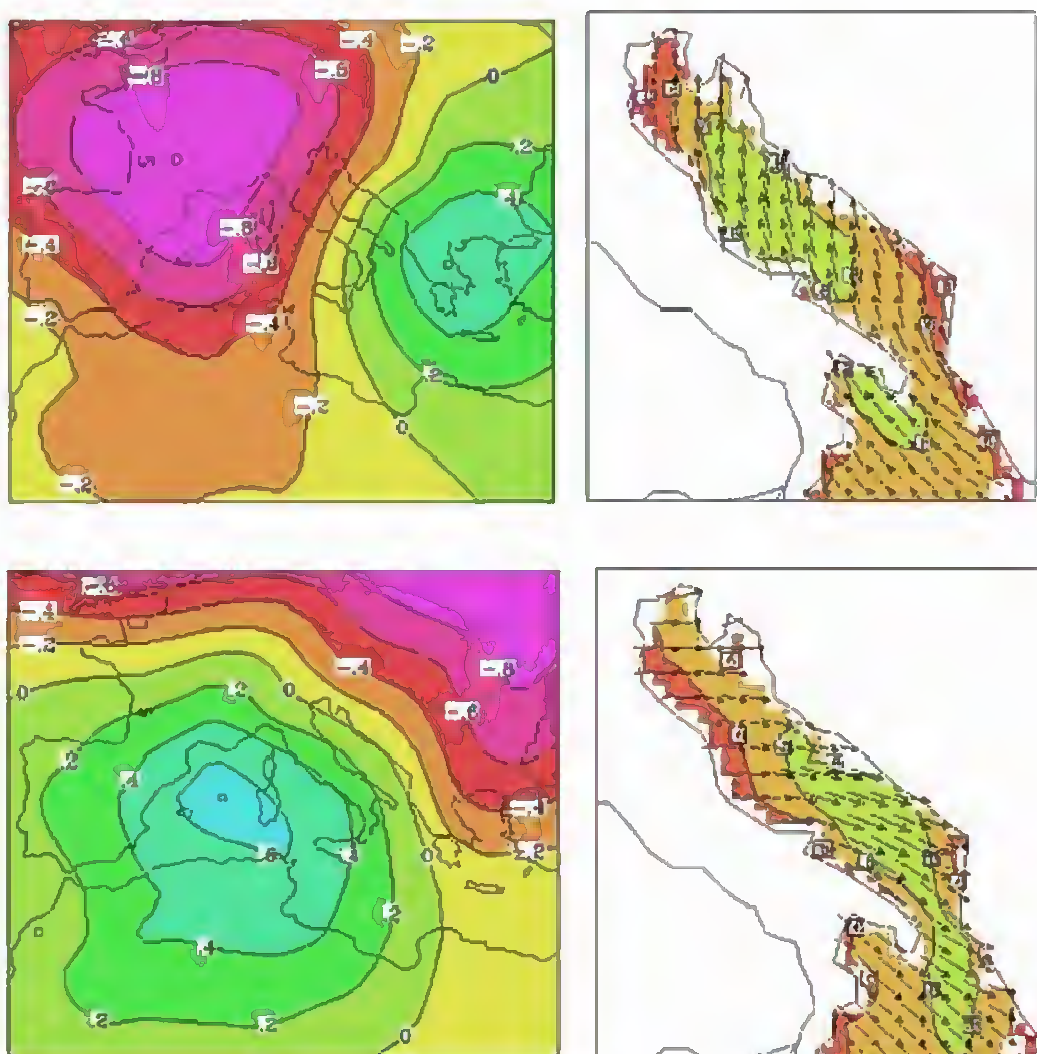


Figura 4.4. Primeras dos parejas canónicas de la CCA entre los campos de presión a nivel del mar (izquierda) y los campos de viento en el mar Adriático (derecha)





Finalmente, también se han utilizado estos métodos estadísticos para determinar correlaciones entre campos espacio-temporales de presión con el oleaje direccional en un punto (Pfizenmayer & Storch, 2001) y entre campos espacio-temporales de presión con campos espacio-temporales de oleaje (Wang et. al., 2004). Esto último es lo que en el presente trabajo se trata de determinar, por lo tanto más adelante se detallarán los resultados a los que llegaron Wang et. al. (2004) en su estudio.

#### 4.4. Correlaciones puntuales entre oleaje y viento

Otra metodología, más sencilla que las anteriores, consiste en determinar la correlación punto a punto entre velocidad de viento y altura de ola significativa (Vikevo et al, 2003). Una vez determinadas las correlaciones entre vientos y oleajes puntuales en la actualidad, se pueden calcular los oleajes futuros a partir de vientos futuros generados por modelos atmosféricos globales en distintos escenarios.

El oleaje en cada posición depende de la energía que le ha transmitido el viento desde su generación, por lo tanto el oleaje de cada punto depende no sólo del viento en ese sitio, sino del campo de vientos en su zona de generación (“fetch”). Así, los oleajes tipo “sea” dependen más del viento local que los oleajes tipo “swell” que son completamente independientes del viento local. Pese a ello se consiguen correlaciones aceptables como se muestra en la figura 4.5, en la que se representa la regresión lineal entre la media mensual de la velocidad de viento al cuadrado y la media mensual de la altura de ola, en Cabo de Palos. Los datos con los que se ha hecho este estudio provienen del retroanálisis del proyecto europeo HIPOCAS, que tiene datos horarios desde 1958 hasta 2001, con una resolución espacial de 0.125°.



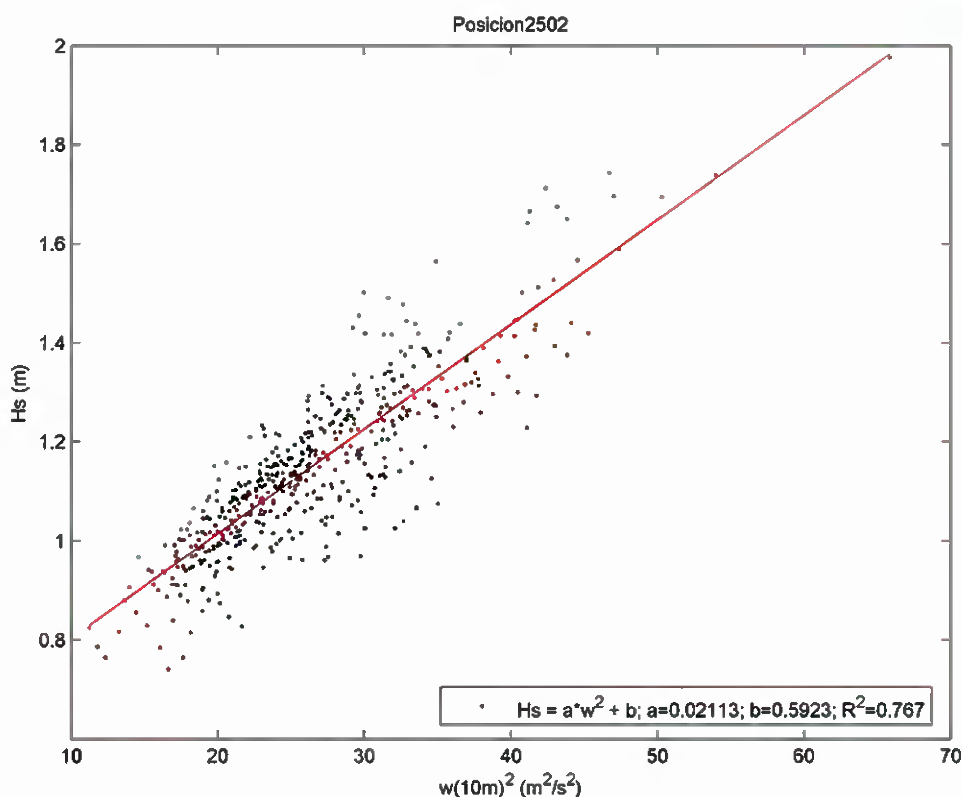


Figura 4.5.  $H_s$  vs  $w^2$ , vientos locales

En el caso de la figura anterior, se representan datos de oleaje locales frente a datos de viento locales y se obtienen correlaciones aceptables. Si comparamos datos de oleaje locales frente a datos de viento generales (provenientes de modelos atmosféricos globales), no se consiguen buenas correlaciones ya que no se ha realizado un correcto “downscaling” para obtener los campos de vientos locales. En la figura 4.6 se representa la regresión lineal entre la media mensual de la velocidad de viento al cuadrado y la media mensual de la altura de ola, en Cabo de Palos. En este caso, los vientos son generados por un modelo atmosférico a escala global del proyecto europeo PRUDENCE, que tiene datos diarios desde 1960 hasta 1990, con una resolución espacial de  $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ .



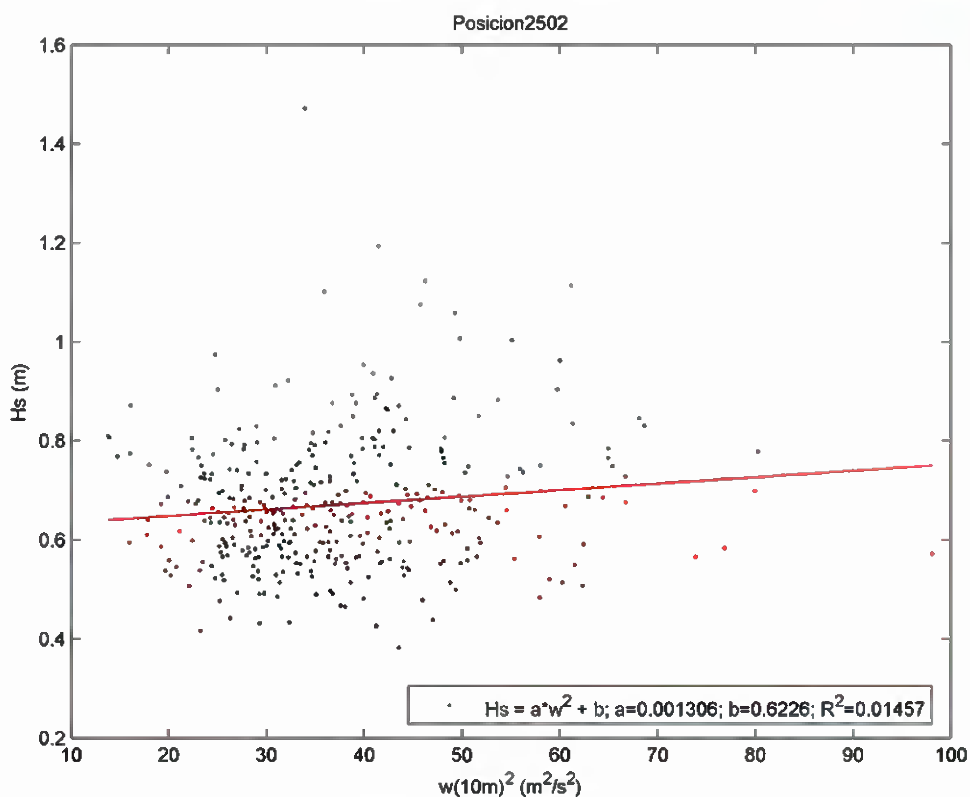


Figura 4.6.  $H_s$  vs  $w^2$ , vientos generales

Para los escenarios de cambio climático en el año 2100 sólo se disponen de vientos provenientes de modelos atmosféricos globales. Por lo tanto, para caracterizar correctamente el oleaje a lo largo de la costa española, se deberá realizar un “downscaling” a los datos de viento para conseguir datos de viento locales.

Así, la correcta metodología consistiría en determinar la correlación punto a punto entre velocidad de viento y altura de ola significativa con datos locales, en la actualidad. Con estas correlaciones, punto a punto locales, se pueden calcular los oleajes futuros a partir de vientos futuros locales. Por lo tanto, se debe realizar un “downscaling” de los datos generados por modelos atmosféricos globales en distintos escenarios, para conseguir datos de viento futuros locales.







## 4.5. Discusión sobre las metodologías

Para la correcta caracterización del oleaje en el litoral español se debería ejecutar un modelo de generación del oleaje como el WAM, adaptándolo al área de influencia de España y forzándolo con los distintos escenarios. Implementar este modelo llevaría un gran esfuerzo computacional, fuera del alcance de este proyecto, por lo cual no se ha optado por aplicar esta metodología para estimar los cambios del oleaje para posibles escenarios de cambio climático.

Otra alternativa es correlacionar los campos espacio-temporales de presión y oleaje mediante la técnica RA. Aunque los datos de presiones provengan de modelos atmosféricos globales y los de oleaje de modelos de generación de oleaje regionales, con diferentes resoluciones, la técnica RA soluciona los problemas de “downscaling”. En la actualidad se dispone de 44 años de datos de oleaje del proyecto HIPOCAS (1958-2001) en el litoral español, con una resolución espacial mínima de  $0.25^\circ$ . Así mismo, se dispone de 31 años de datos de presiones del proyecto PRUDENCE (1960-1990) y otros 31 años de datos de presiones (2070-2100) ejecutados con el escenario de cambio climático A2, para la malla HadAM3H, que se muestra en la figura 4.7, con una resolución de  $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ .

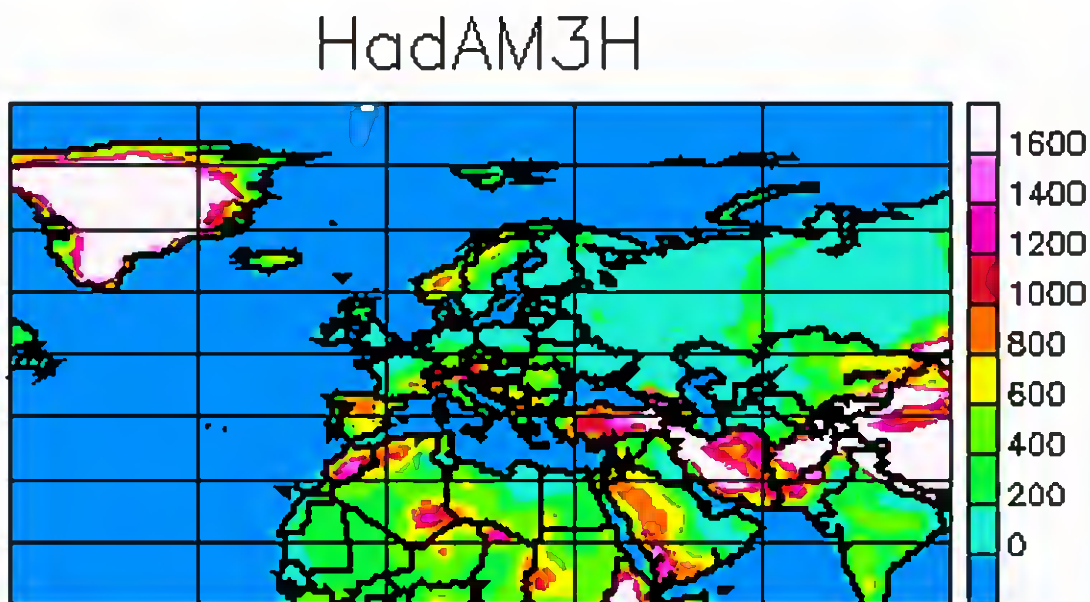


Figura 4.7. Malla HadAM3H de campos de presiones del proyecto PRUDENCE





Por lo tanto se pueden correlacionar los campos de presiones con los de oleaje entre 1960 y 1990; con esas correlaciones y las presiones entre 2070 y 2100 determinar los oleajes del periodo 2070-2100 en el litoral español. Para realizar esta tarea correctamente se debería simular en el periodo 1960-1990 y a la escala de resolución del PRUDENCE el modelo de oleaje WAM. Lógicamente, esto también requeriría una gran cantidad de trabajo que sobrepasa el alcance de este estudio. Por ello, se ha optado por analizar los resultados del trabajo de Wang et. al. (2004) que utilizan a una metodología análoga a ésta y que muestran resultados del litoral atlántico español, aunque a una escala muy grosera.

La última metodología presentada, que correlaciona punto a punto el oleaje con el viento, presenta el problema del “downscaling” en los futuros campos de vientos. Se conocen los campos de vientos futuros (2070-2100) del modelo atmosférico global del proyecto PRUDENCE, pero es necesario conocer la predicción a futuro del viento local. Se debería realizar un “downscaling” de los futuros campos de vientos para determinar los oleajes futuros con las correlaciones determinadas en el presente entre oleaje y viento local. Desarrollar esta metodología exigiría un esfuerzo similar a las otras dos primeras y es mucho menos correcta; por lo tanto se rechaza su utilización.

En síntesis, el principal problema que se tiene para caracterizar el oleaje, en el litoral español, para los diferentes escenarios futuros es el “downscaling”. Para solventar este problema habría que recurrir a procedimientos empíricos/estadísticos que se salen del ámbito de este estudio. No obstante, la manera más eficaz de solucionar esto es mediante la técnica estadística RA. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el Atlántico Norte por el Servicio Meteorológico de Canadá (Wang et. al., 2004).

## **4.6. Resultados de “North Atlantic Ocean Wave Climate Change Scenarios for the 21<sup>st</sup> Century” (Wang et. al., 2004)**

### **4.6.1. Metodología**

Estos resultados caracterizan el oleaje en el futuro, para distintos escenarios, en el Atlántico Norte y no incluyen al mar Mediterráneo. Por lo tanto sólo se van a comentar los resultados en el litoral cantábrico, costa Gallega atlántica, costa atlántica de Andalucía y archipiélago canario. Como ya se ha mencionado, correlacionando la presión atmosférica al nivel del mar (SLP) con la altura de ola significativa ( $H_s$ ), mediante la técnica RA, se han construido campos de  $H_s$  para tres posibles escenarios (IS92a, A2 y B2) de cambio climático hasta el 2100.





Se han usado los resultados de SLP de un modelo climático global (CGCM2) de segunda generación ejecutado con los tres escenarios futuros, entre 1850 y 2100 para el escenario IS92a y entre 1990 y 2100 para los escenarios A2 y B2. Así mismo se han usado los datos de retroanálisis de  $H_s$  ejecutados por un modelo de oleaje (OWI 3G) de tercera generación entre 1958 y 1997.

Se han construido dos modelos de regresión (RA) uno para el régimen medio estacional de  $H_s$  y otro para el régimen extremal estacional de  $H_s$ . El régimen medio estacional de  $H_s$  se caracteriza por la media estacional de  $H_s$  y los percentiles estacionales del 90% y 99% de  $H_s$ . Por otro lado, el régimen extremal estacional se caracteriza a partir de un análisis no estacionario de la función de distribución de máximos anuales GEV (“non-stationary generalizad extreme value analysis”). Se realizan únicamente las correlaciones en las estaciones de invierno (enero, febrero y marzo) y de otoño (octubre, noviembre y diciembre), pues las correlaciones de las estaciones de primavera (abril, mayo y junio) y de verano (julio, agosto y septiembre) son mucho peores.

Para el régimen medio de  $H_s$  se han determinado las correlaciones entre las predicciones de la media estacional de SLP del modelo atmosférico para el escenario IS92a y la media estacional de  $H_s$  y los percentiles de  $H_s$  del 90% y 99%, para los 40 años en los que se ejecutó el modelo de oleaje. Con esas correlaciones y considerando que se conserva constante en el tiempo, se determinan la media estacional de  $H_s$  y los percentiles del 90% y 99%, a partir de las predicciones de la media estacional de SLP del modelo atmosférico para los tres escenarios entre 1990 y 2100.

Para determinar el futuro régimen extremal de  $H_s$  primeramente se han determinado las correlaciones entre las predicciones de la media estacional de SLP y del gradiente al cuadrado de SLP del modelo atmosférico para el escenario IS92a y la máxima  $H_s$  estacional, para los 40 años en los que se ejecutó el modelo de oleaje. Con esas correlaciones y considerando que se conserva constante en el tiempo, se determinan las máximas  $H_s$  estacionales a partir de las predicciones de la media estacional de SLP y del gradiente al cuadrado de SLP del modelo atmosférico para los tres escenarios entre 1990 y 2100.

Por lo tanto se caracteriza el régimen medio estacional y el régimen extremal estacional del oleaje para el futuro. A continuación se van a ir comentando las figuras que representan los cambios en el oleaje para los tres escenarios de cambio climático del trabajo de Wang et. al. (2004), primeramente las del régimen medio estacional de  $H_s$  en invierno y en otoño y posteriormente las del régimen extremal estacional de  $H_s$  en invierno y en otoño.







#### **4.6.2. Variaciones de régimen medio**

En la figura 4.8 se muestran los cambios en la media estacional de invierno y otoño de  $H_s$  en el periodo desde 1990 hasta 2080. En la figura 4.8 (a) se representa la tendencia de invierno para el escenario IS92a, la cual sólo es significativa para la zona de Andalucía y Canarias, y disminuye 2.5 cm. En la figura 4.8 (b) se representa la tendencia de otoño, pero no es significativa para ninguna zona del litoral español. En la figura 4.8 (c) se representa la tendencia de invierno para el escenario 2A, que para la zona del Cantábrico aumenta 15 cm, para la zona de Galicia aumenta 7.5 cm, para la zona de Andalucía disminuye 2.5 cm y para la zona de Canarias no presenta variaciones. En la figura 4.8 (d) se representa la tendencia de otoño para el escenario 2A, que sólo es significativa para la zona de Andalucía y Canarias, y disminuye menos de 2.5 cm. En las figuras 4.8 (e) y (f) se representan las tendencias para el escenario 2B, pero no son significativas para ninguna zona del litoral español.

En la figura 4.9 se muestran los cambios en la media estacional de invierno y otoño de los percentiles del 90% y 99% de  $H_s$  en el periodo desde 1990 hasta 2080, para el escenario A2. En la figura 4.9 (a) se representa la tendencia de invierno de  $H_{s,90\%}$ , la cual para la zona del Cantábrico aumenta 28 cm, para la zona de Galicia aumenta 14 cm, para la zona de Andalucía disminuye menos de 7 cm y para la zona de Canarias disminuye 7 cm. En la figura 4.9 (b) se representa la tendencia de otoño, pero sólo es significativa para la zona del Cantábrico, con un aumento de 21 cm y para la zona de Canarias aumenta 7 cm. En la figura 4.9 (c) se representa la tendencia de invierno de  $H_{s,99\%}$ , que para la zona del Cantábrico aumenta 30 cm, para la zona de Galicia aumenta 15 cm, para la zona de Andalucía disminuye menos de 15 cm y para la zona de Canarias ni aumenta ni disminuye. En la figura 4.9 (d) se representa la tendencia de otoño, pero no es significativa para ninguna zona del litoral español.



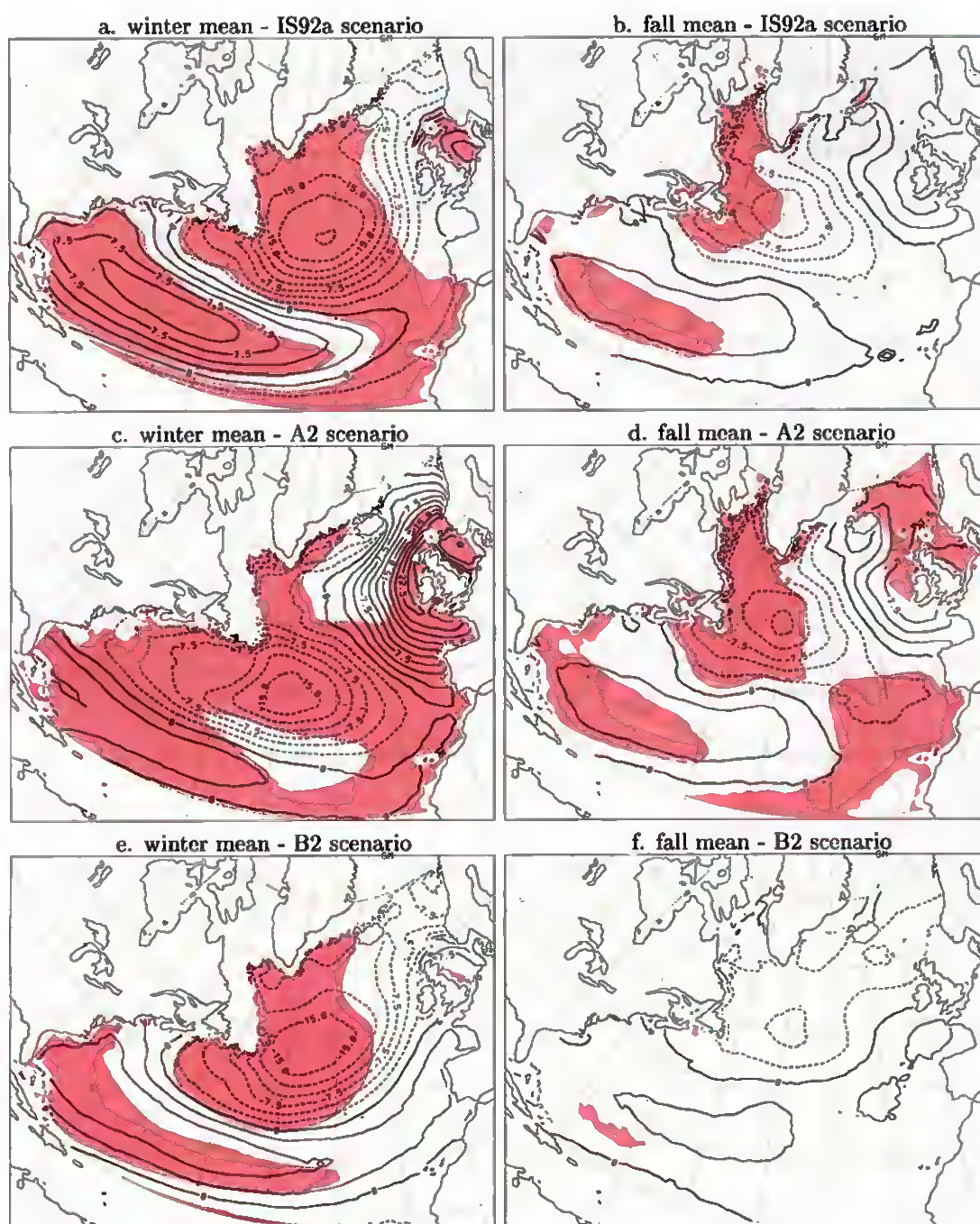


Figura 4.8. Cambios en la media estacional de invierno (izquierda) y otoño (derecha) de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) en el periodo desde 1990 hasta 2080 (2080 menos 1990), que se pronostican con los escenarios forzadores indicados. Isolíneas cada 2.5 cm. Las líneas continuas y las punteadas son isolíneas positivas y negativas, respectivamente. El sombreado indica áreas de tendencia cuadrática significativa (Wang et. al., 2004).



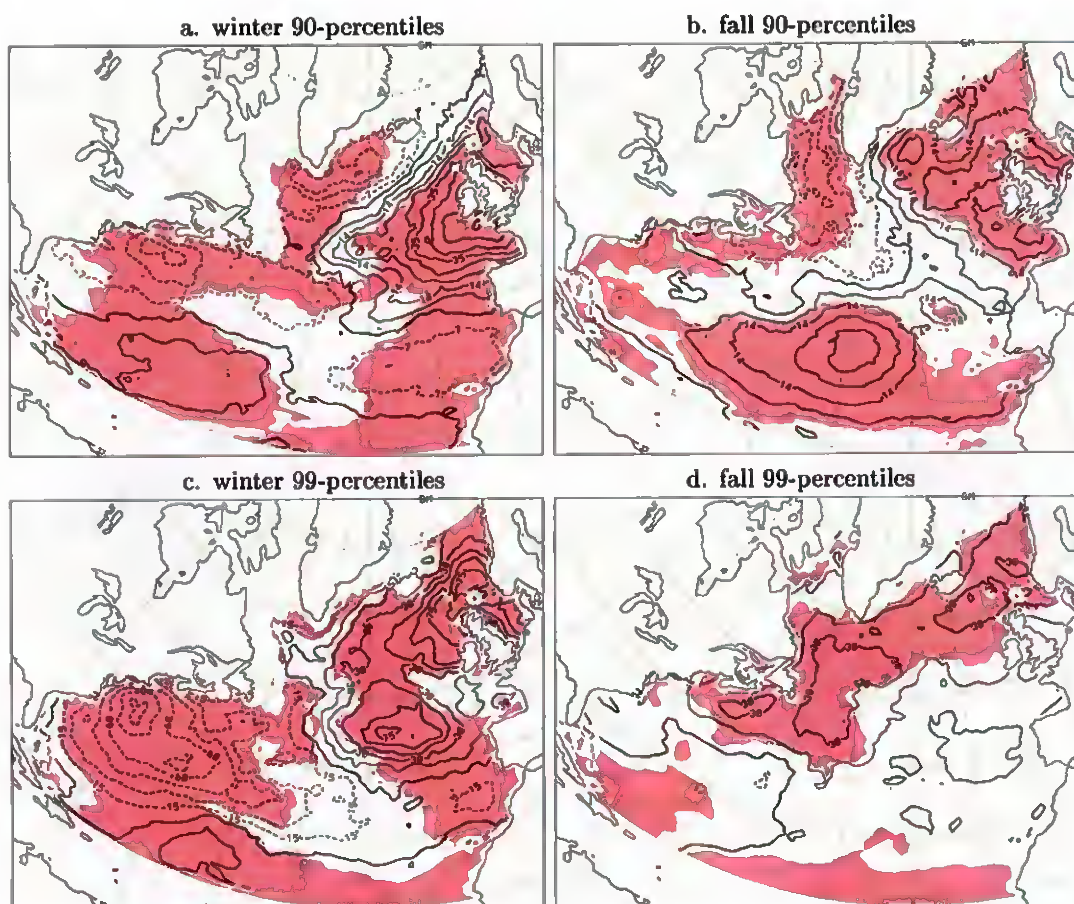


Figura 4.9. Cambios en la media estacional de invierno (izquierda) y otoño (derecha) de los percentiles del 90% y 99% de altura de ola significativa ( $H_{s90\%}$  y  $H_{s99\%}$ ) en el periodo desde 1990 hasta 2080 (2080 menos 1990), que se pronostican con el escenario forzador A2. Isolíneas cada 7 cm y 15 cm para los percentiles del 90% y 99%, respectivamente. Las líneas continuas y las punteadas son isolíneas positivas y negativas, respectivamente. El sombreado indica áreas de tendencia cuadrática significativa (Wang et. al., 2004).





### **4.6.3. Variaciones de régimen extremal**

En la figura 4.10 se muestran los cambios en la media estacional de invierno y otoño de  $H_{sT=20}$  en el periodo desde 1990 hasta 2080. En la figura 4.10 (a) se representa la tendencia de invierno para el escenario IS92a, que no es significativa para las zonas del Cantábrico ni para la zona de Andalucía, para la zona de Galicia disminuye menos de 15 cm y para la zona de Canarias permanece constante. En la figura 4.10 (b) se representa la tendencia de otoño, que para la zona del Cantábrico no es significativa, para la zona de Galicia disminuye 15 cm y para las zonas de Andalucía y Canarias aumenta 15 cm. En la figura 4.10 (c) se representa la tendencia de invierno para el escenario 2A, que para la zona del Cantábrico aumenta 15 cm, para la zona de Galicia ni aumenta ni disminuye, para la zona de Andalucía no es significativa y para la zona de Canarias aumenta 15 cm. En la figura 4.10 (d) se representa la tendencia de otoño para el escenario 2A, que para la zona del Cantábrico no es significativa, para la zona de Galicia disminuye 15 cm y para las zonas de Andalucía y Canarias aumenta 15 cm. En la figura 4.10 (e) y (f) se representan la tendencias de invierno y otoño para el escenario 2B, sólo son significativas las de Canarias, que aumentan 15 cm.





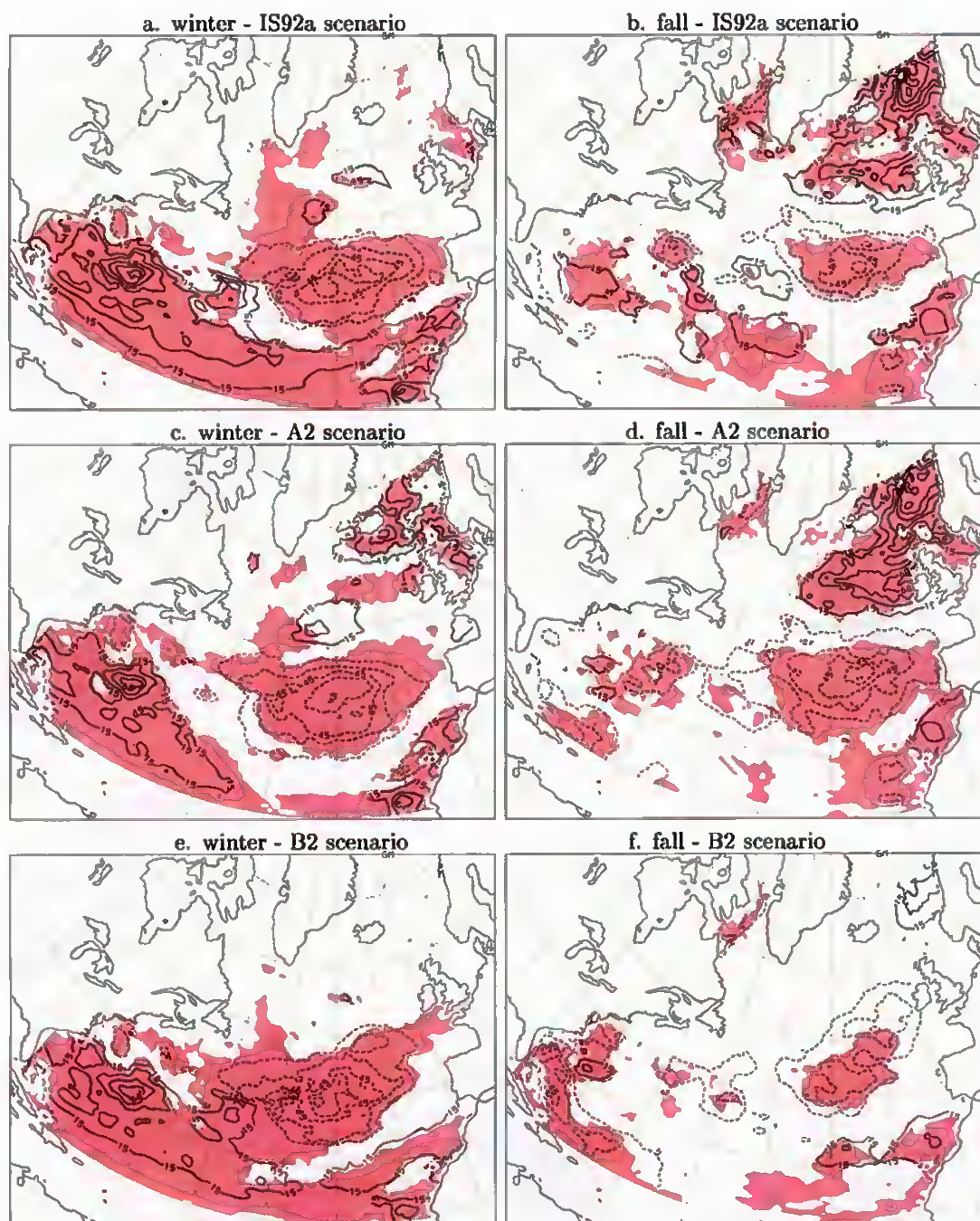


Figura 4.10. Cambios en la media estacional de invierno (izquierda) y otoño (derecha) de la altura de ola significativa de 20 años de periodo de retorno ( $H_{sT=20}$ ) en el periodo desde 1990 hasta 2080 (2080 menos 1990), que se pronostican con los escenarios forzadores indicados. Isolíneas cada 15 cm. Las líneas continuas y las punteadas son isolíneas positivas y negativas, respectivamente. El sombreado indica áreas de tendencia cuadrática significativa del parámetro de localización del régimen extremal de  $H_s$  (Wang et. al., 2004).





#### 4.6.4. Conclusiones

Por lo tanto se podría concluir que, en términos generales, los oleajes invernales aumentarían en el litoral gallego y en la cornisa cantábrica y disminuirían en la costa atlántica de Andalucía y en el archipiélago canario. A modo de ejemplo, en la tabla 4.1 se resumen las diferencias de los parámetros, tanto del régimen medio de  $H_s$  como del régimen extremal de  $H_s$ , de 2080 menos 1990, para invierno y para el escenario A2.

	Régimen medio de $H_s$			Régimen extremal de $H_s$
	$\overline{H}_s$	$H_{s90\%}$	$H_{s99\%}$	$H_{sT=20}$
Cantábrico	+15 cm	+28 cm	+30 cm	+15 cm
Galicia	+7.5 cm	+14 cm	+15 cm	0 cm
Andalucía	-2.5 cm	-5 cm	-10 cm	0 cm
Canarias	0 cm	-7 cm	0 cm	+15 cm

Tabla 4.1

En la figura 4.11 se representan los resultados de la tabla 4.1 para el régimen medio de  $H_s$ , es decir la diferencia entre los parámetros medios de invierno del año 2080 menos los del 1990, ejecutados para el escenario A2.

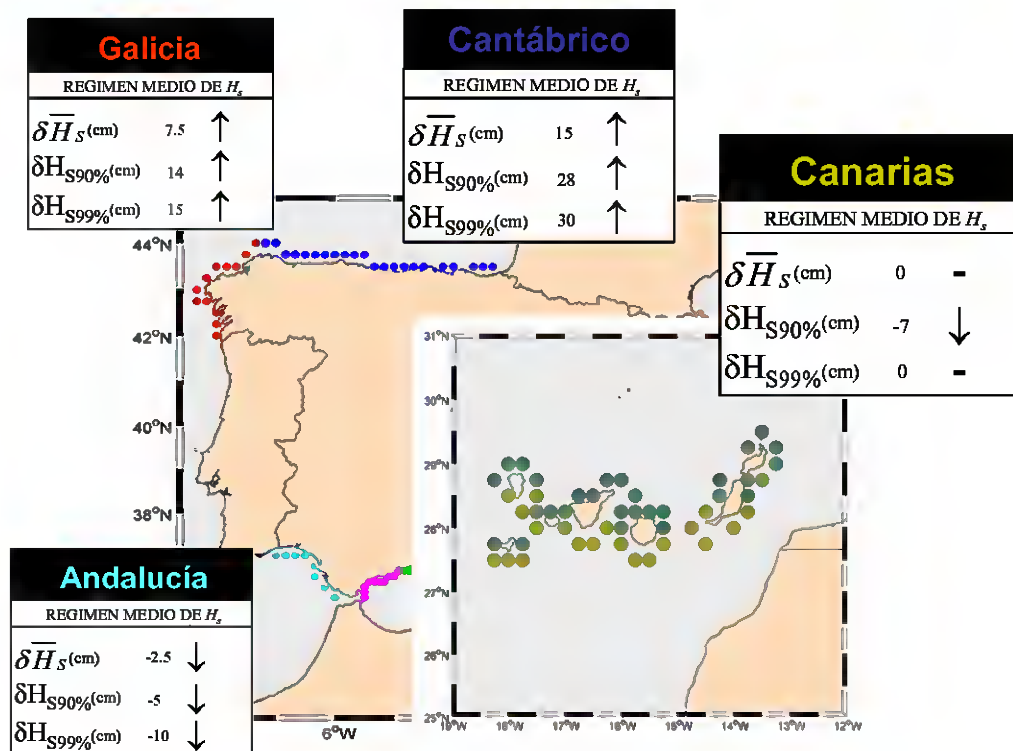


Figura 4.11. Prognosis de cambio del régimen medio de  $H_s$





En la figura 4.12 se representan los resultados de la tabla 4.1 para el régimen extremal de  $H_s$ , es decir la diferencia entre los parámetros medios de invierno del año 2080 menos los del 1990, ejecutados para el escenario A2.

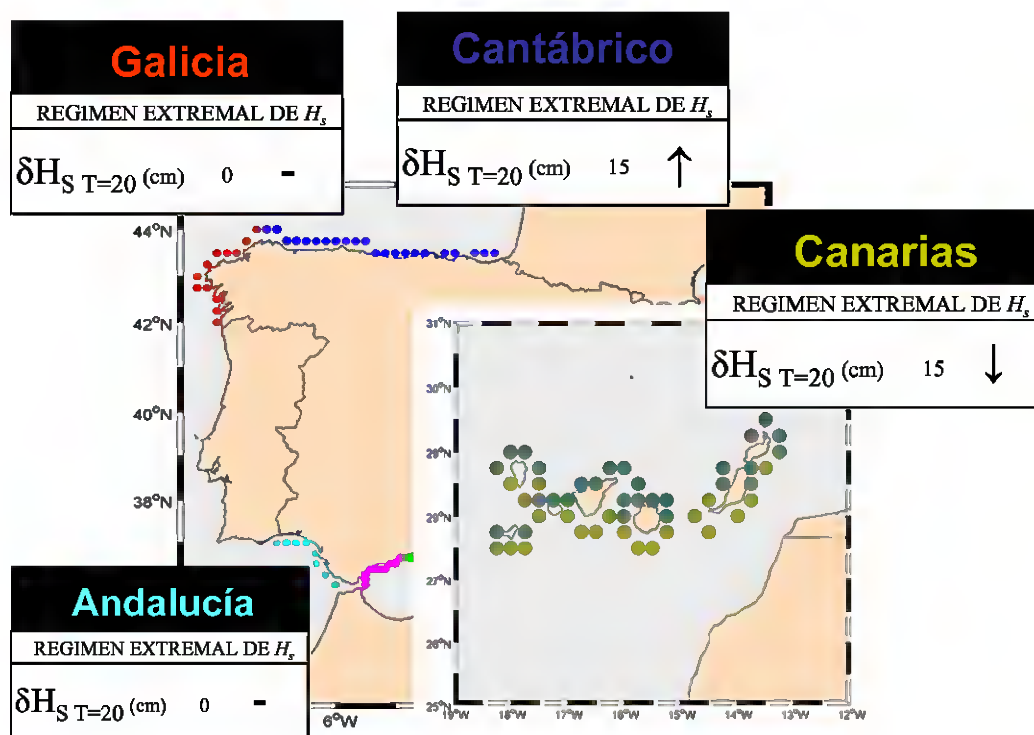


Figura 4.12. Prognosis de cambio del régimen extremal de  $H_s$



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE PROGNOSIS DE CAMBIO DE  
CAUDAL FLUVIAL Y SEDIMENTO**

---





## 5. ANÁLISIS DE PROGNOSIS DE CAMBIO DE CAUDAL FLUVIAL Y SEDIMENTO

### 5.1. Variación del caudal fluvial

Se ha contado con las bases de datos del proyecto WRINCLE (Water Resources: the Impact of Climate change in Europe, ENV4-CT97-0452) financiado por la Unión Europea. Dicho proyecto ha tenido como objetivo evaluar el impacto que el cambio climático y su variabilidad ha tenido sobre los recursos hídricos en Europa. Para ello, han evaluado los caudales, la disponibilidad de los recursos hídricos y la calidad del suministro de energía hidroeléctrica a partir de modelos atmosféricos de última generación con los que han generado diferentes escenarios de cambio climático (el escenario de doble de CO<sub>2</sub> en la atmósfera). Como resultado han presentado una serie de Atlas digitales que incluyen, entre otros: funciones de distribución de caudales medios y factores de torrencialidad diaria durante el periodo 1961-1990 y para el escenario de cambio climático con el doble de CO<sub>2</sub> (<http://wrsrl.ncl.ac.uk/wrincl>).

El objetivo de modelar las descargas, se debe a la necesidad de desarrollar una metodología regionalizada, para estimar, por ejemplo, la descarga de un río a partir de parámetros tales como la precipitación o las características de la cuenca, ya que la variabilidad espacial de la lluvia no puede ser representada por modelos generales, debido a que éstos no pueden simular aspectos tan importantes como las pérdidas o los flujos de tormenta puesto que los procesos hidrológicos, presentan escalas de captación muy pequeñas, difíciles de modelar. En concreto, la escorrentía neta superficial (diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración) se ha modelado a través de la distribución log-normal, expresada como:

$$f(Q) = \frac{1}{Q \cdot b \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log(Q) - a)^2}{2 \cdot b^2}\right)$$

donde los parámetros  $a$  y  $b$ , se pueden definir usando el método de momentos, de forma que:

$$a = \frac{1}{2} \cdot \log\left(\frac{Qm^2}{CVm^2 + 1}\right) \quad b = \sqrt{\log(CVm^2 + 1)}$$

$Qm$  y  $CVm$ , son el caudal medio y el coeficiente de variación medio respectivamente. En la figura 5.1 se muestra, para toda Europa, diversos resultados de variación estacional de la escorrentía media y del coeficiente de variación (torrencialidad).



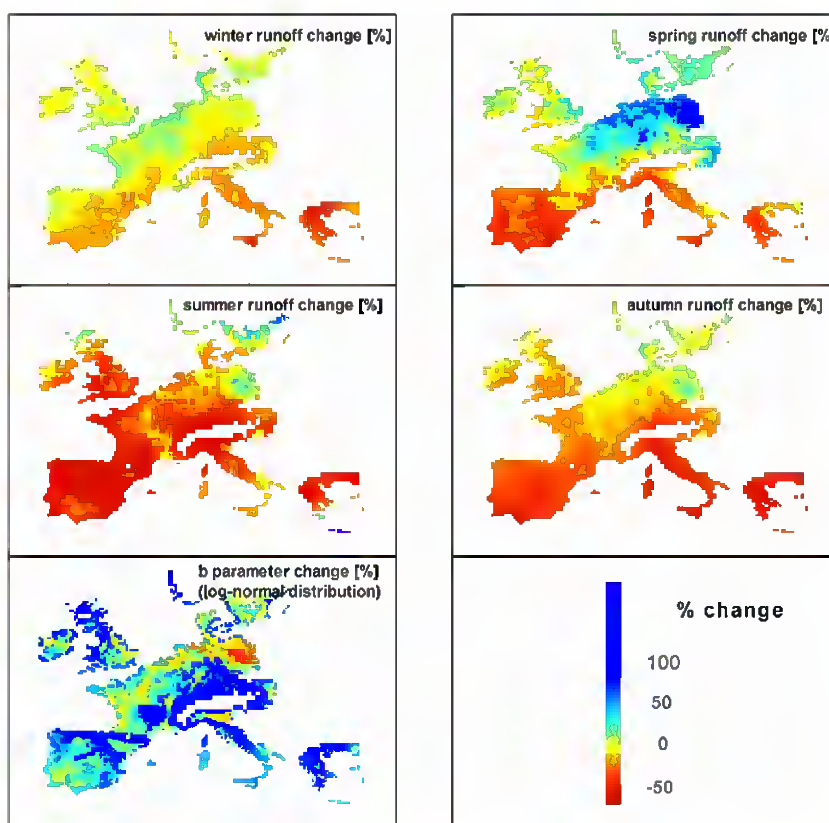


Figura 5.1. Cambio estacional (%), para la escorrentía estacional y para el parámetro de  $b$  de la distribución log-normal.

En España, los resultados obtenidos para el caudal medio,  $Q_m$ , y el coeficiente variación medio,  $CV_m$ , para un instante actual y un instante futuro (figura 5.2) muestran una moderada disminución de la escorrentía media y un importante aumento de la torrencialidad en la zona del Levante en el horizonte de 100 años, y para el escenario de cambio climático considerado (figura 5.3).



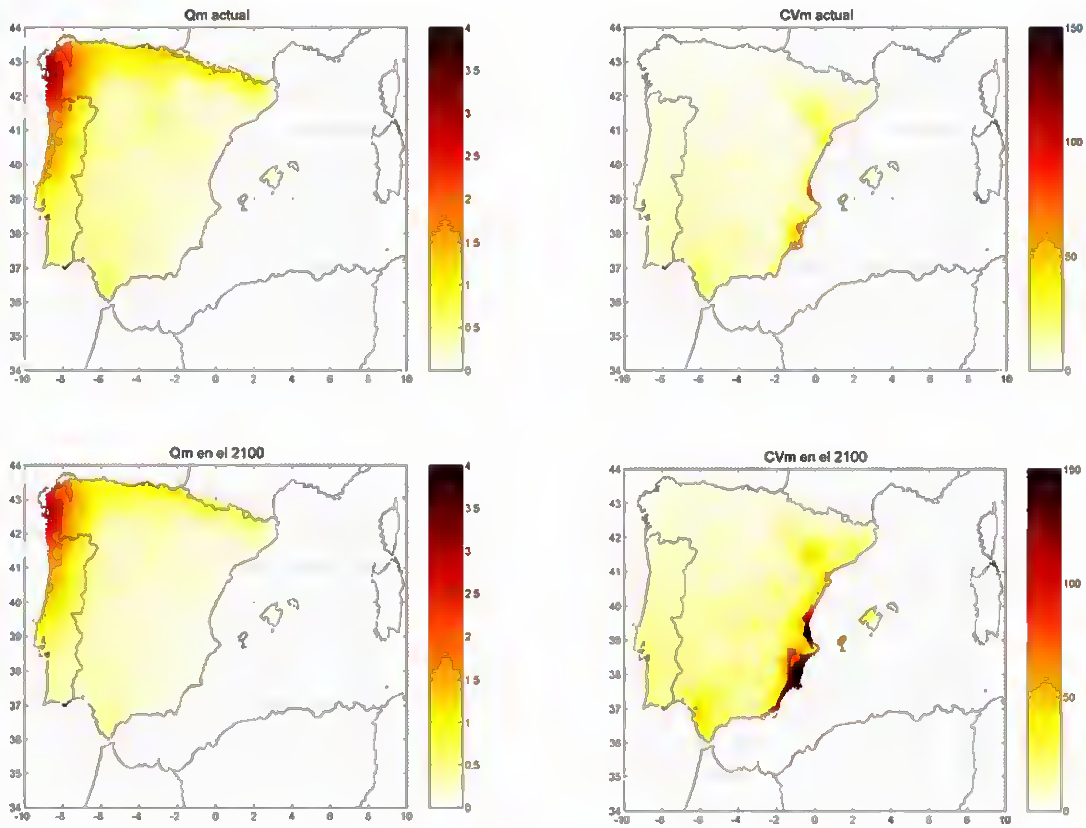


Figura 5.2. Resultados del caudal medio,  $Q_m$ , y el coeficiente variación medio,  $CV_m$ , para un instante actual y un instante futuro.

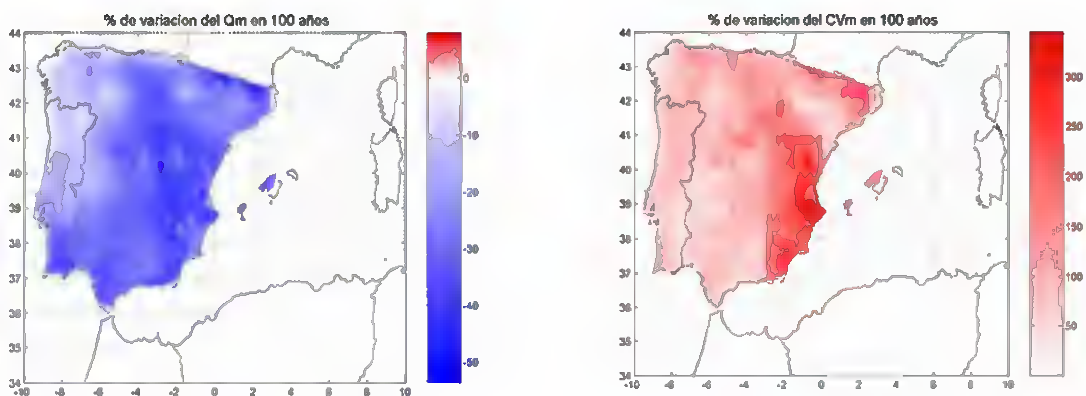


Figura 5.3 Variación media del caudal medio,  $Q_m$ , y del coeficiente del variación medio,  $CV_m$ .





Existe por tanto, una marcada tendencia al aumento de la torrencialidad de los eventos hidrológicos, con una moderada reducción en el caudal medio.

## 5.2. Variación del caudal de sedimento

El trabajo realizado para la recopilación de datos de caudal sólido, ha puesto claramente de manifiesto la ausencia generalizada de datos en todas las cuencas. A esto hay que añadir que prácticamente todas las cuencas importantes se encuentran reguladas, lo cual redundaría en la inexistencia de aportaciones de caudal sólido en nuestras costas. Por otro lado, la puesta en marcha de los planes hidrológicos de cuenca va a producir una mayor regulación de nuestra red fluvial limitando aún más el aporte de sólidos a la costa. Para soslayar el problema de ausencia de datos se ha hecho un análisis completando las bases de datos existentes mediante la generación de datos numéricos de caudal sólido. Para ello, se han utilizado modelos basados en la ecuación MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). Este tipo de modelos de erosión han sido suficientemente probados en todo el mundo y generan información bastante fiable.

El objetivo final, es proporcionar información detallada del aporte de sedimento futuro en la Península Ibérica, de manera que por ejemplo, exista información del tanto por ciento de variación de caudal sólido,  $\%Q_s$ .

La Ecuación MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), o la ecuación universal de pérdida del suelo se expresa como

$$Sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot k_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

donde

$Sed$ , es la producción de sedimento en un día dado (en toneladas métricas).

$Q_{surf}$ , es el volumen de la escorrentía superficial (mm H<sub>2</sub>O/ha).

$Q_{peak}$ , es la tasa máxima de escorrentía (m<sup>3</sup>/s).

$area_{hru}$ , es el área de la HRU (ha).

$k_{USLE}$ , es el factor de erosión del suelo de USLE (0,013 toneladas métricas m<sup>2</sup> hr/(m<sup>3</sup>-tonelada métrica cm)).

$C_{USLE}$ , es el factor de la cubierta y de la gerencia de USLE.

$P_{USLE}$ , es el factor de la ayuda práctica de USLE.

$LS_{USLE}$ , es el factor topográfico de USLE.

$CFRG$ , es el factor grueso del fragmento.

La ecuación de MUSLE, proviene de la ecuación USLE modificada, que predice la erosión media anual en función de la precipitación. En la ecuación MUSLE, el factor de la energía





de precipitación es reemplazado por el factor de escorrentía. Esto mejora la predicción de la producción del sedimento, elimina la necesidad de diversos cocientes, y permite que la ecuación sea aplicada al acontecimiento individual de la tormenta.

Asumiendo válida la distribución lognormal de escorrentía neta (o caudal fluvial) y fijando el resto de parámetros, el caudal sólido,  $Q_s$ , que transporta un río se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_s = \alpha \cdot e^{\frac{a\beta + b^2\beta^2}{2}}$$

donde  $\alpha$  es una constante y  $\beta = 1.14$ .

El caudal sólido,  $Q_s$ , por tanto, depende del factor  $\beta$ , con lo que dependiendo del valor de éste, los escenarios de cambios previsibles para una situación futura, podrían ser los que a continuación muestran la figura 5.4.

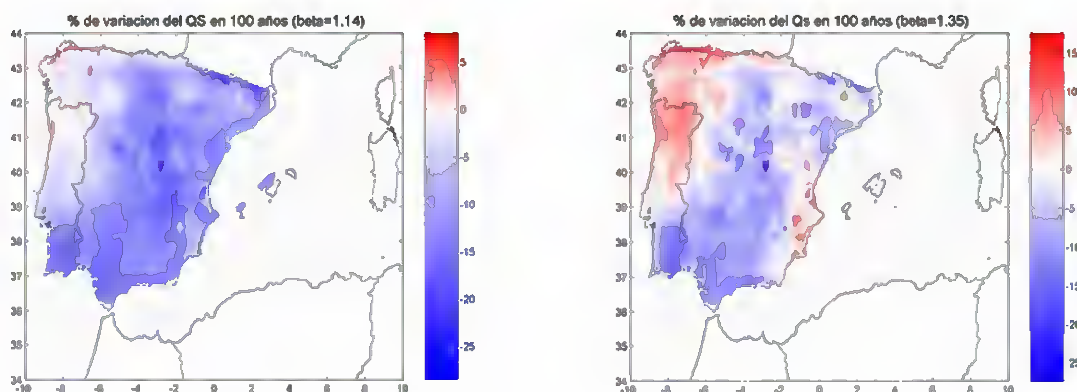


Figura 5.4. Variación del caudal sólido,  $Q_s$ , a lo largo de 100 años para diferentes valores de  $\beta$ .

Por lo tanto, es esperable una ligera reducción del aporte de sedimento a las costas, excepto en la zona norte de Galicia y de Asturias. No obstante, el efecto verdaderamente importante y claramente impredecible es el modelo de gestión de los recursos hídricos que se plantee para España en el siglo XXI. De llevarse a cabo lo contemplado en los Planes Hidrológicos de Cuenca (construcción de multitud de presas), la reducción del aporte de sedimentos sería mayor. Nótese, a modo de ejemplo, como la construcción de las presas de Mequinenza, Ribarroja y Flix en la cuenca del Ebro en la segunda mitad del siglo XX ha limitado a más del 95% el aporte de sedimento al delta del Ebro.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

---



**FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA  
A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

**CAPÍTULO 6. REFERENCIAS**

---





## 6. REFERENCIAS

IPCC (2000): *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. Cambridge University Press, 599 pp.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers*, 145 pags.

LANGENBERG, H.; PFIZENMAYER, A.; STORCH, H. von; SÜNDERMANN, J. (1999). *Storm-related sea level variations along the North Sea coast: natural variability and anthropogenic change*. Continental Shelf Research 19 (1999) 821-842.

PFIZENMAYER, A.; STORCH, H. von (2001). *Anthropogenic climate change shown by local wave conditions in the North Sea*. Climate Research. Vol. 19: 15-23, 2001.

PRUDENCE (2004): Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (PRUDENCE) (On line: <http://www.prudence.dmi.dk/>.)

STORCH, H. von; REICHARD, H. (1997). *A Scenario of Storm Surge Statistics for the German Bight at Expected Time of Doubled Atmospheric Carbon Dioxide Concentration*. Journal of Climate. Vol 10. 2653-2662.

STOWASUS-2100 (2001): The STOWASUS-2100 Group (E. Kaas, R. Flather, P. Lionello, P. Malguzzi, H. von Storch, J. de Ronde y M.Reistad). *Regional storm, wave and surge scenarios for the 2100 century (STOWASUS-2100). Final report* (On line: <http://www.dmi.dk/pub/STOWASUS-2100/>.)

VIKEVO, F.; FUREVIK, T.; FURNES, G.; KVAMSTØ, N. G.; REISTAD, M. (2003). *Wave height variations in the North Sea and on the Norwegian Continental Shelf, 1881-1999*. Continental Shelf Research 23 (2003) 251-263

WAMD1 (1988): The Wave Model Development and Implementation Group (S.Hasselmann, K.Hasselmann, E.Bauer, P.A.E.M.Janssen, G.J.Komen, L.Bertotti, P.Lionello, A.Guillaume, V.C.Cardone, J.A.Greenwood, M.Reistad, L.Zambresky, J.A.Ewing). *The WAM model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model*. Journal of Physical Oceanography Vol. 18, No. 12 1988.

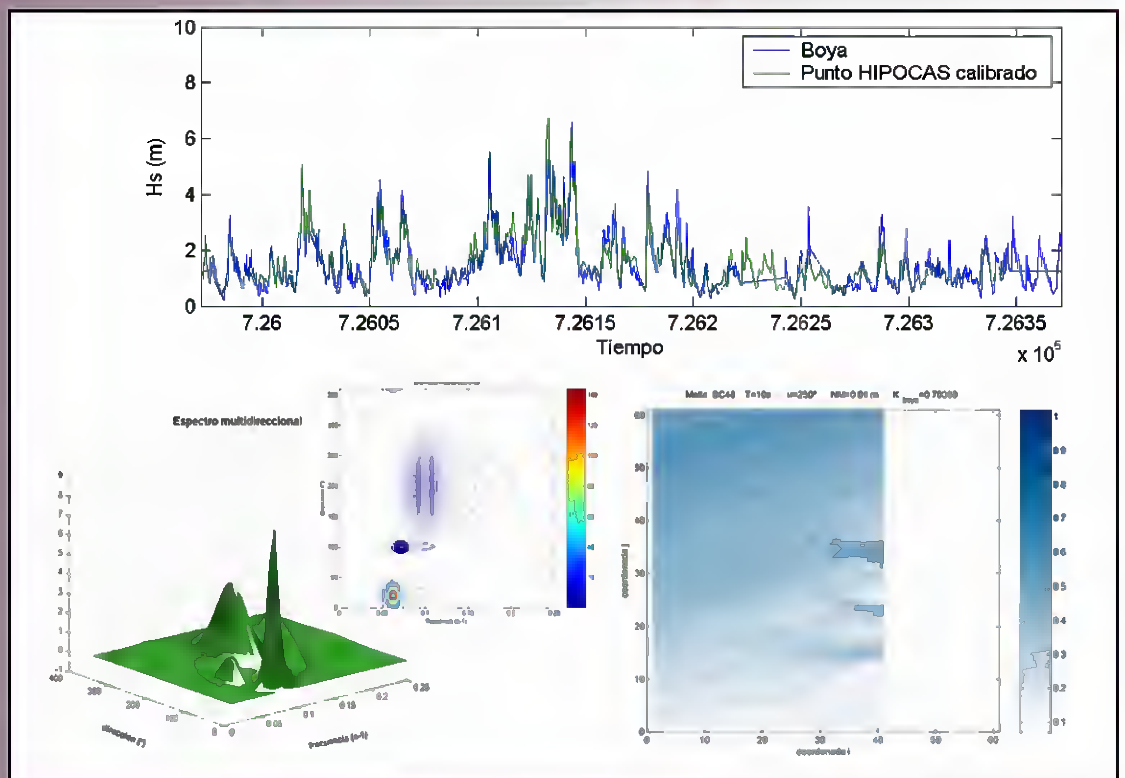
WANG, X. L.; ZWIERS, F. W.; SWAIL, V. R. (2004). *North Atlantic Ocean Wave Climate Change Scenarios for the 21<sup>st</sup> Century*. Journal of Climate, 2004 (in press)

WASA (1998): The WASA Group. *Changing waves and storms in the Northeast Atlantic?* Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(5), 741-760.



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



### ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE "BOYAS NUMÉRICAS"



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE "BOYAS NUMÉRICAS"**

---



**ANEJO I -1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE  
"BOYAS NUMÉRICAS"**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Anejo I-1) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en "MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO", suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

#### **FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

#### **FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE "BOYAS NUMÉRICAS"**

### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsible cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por "elementos del litoral", y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Anejo I-1:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Anejo I-1. Resultados de calibración puntual de “boyas numéricas”.**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

---



**ANEJO I -1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE  
“BOYAS NUMÉRICAS”**

---



## RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE "BOYAS NUMÉRICAS"

A continuación se presentan todos los resultados correspondientes al apartado de Calibración boya a boya que se organizan de la siguiente manera:

- Matriz de coeficientes de propagación (para los diferentes niveles de marea).
- Gráficos de la evolución de los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ .
- Gráficos de la calibración de  $H_S$  y  $T_m$ .

Para las boyas correspondientes a la zona del Atlántico, situadas en:

- A CORUÑA
- BILBAO
- CADIZ
- FARO
- FIGUEIRA DA FOZ
- GIJON
- LAS PALMAS
- SILLEIRO
- SINES
- TENERIFE

Y para las boyas correspondientes a la zona del Mediterráneo, situadas en:

- ALICANTE
- CABO DE GATA
- CABO DE PALOS
- CAP DE PERA
- CEUTA
- LLOBREGAT
- MALAGA
- PALAMOS
- ROSAS
- TARRAGONA
- TORDERA
- TORTOSA
- VALENCIA





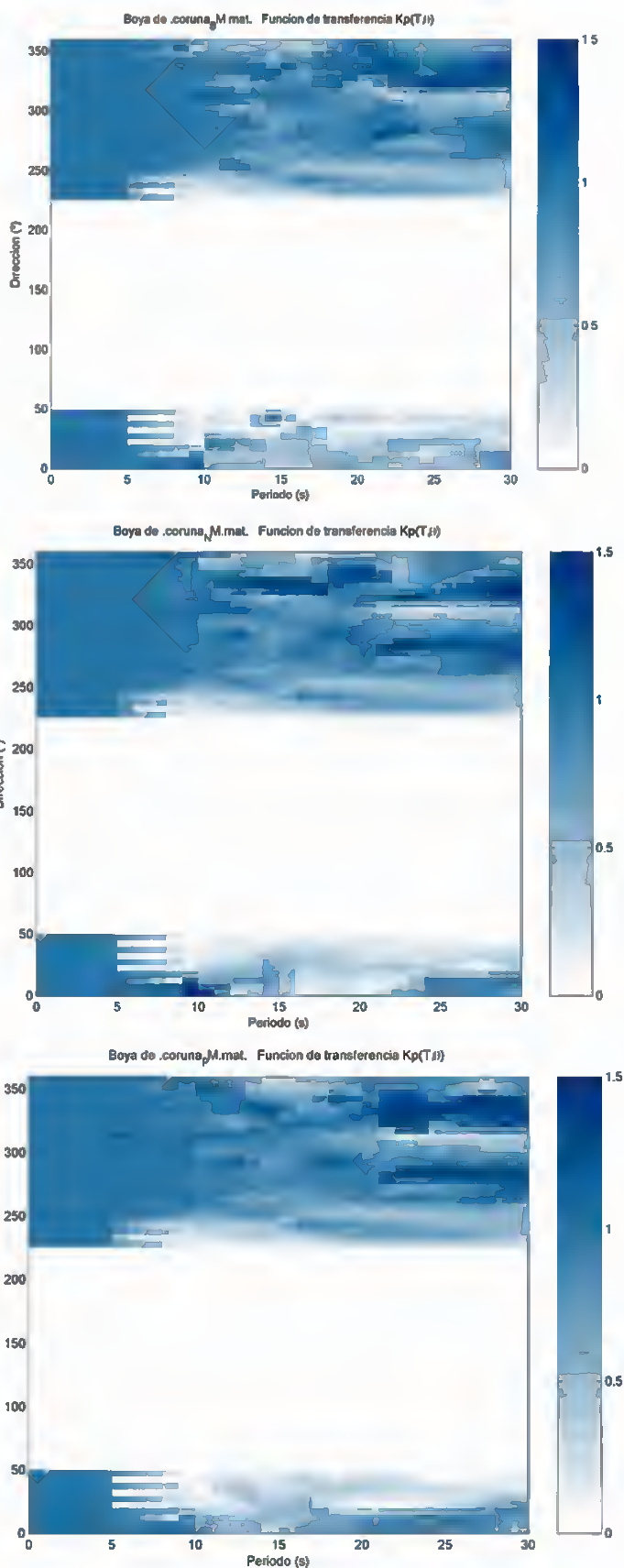
**ATLÁNTICO**





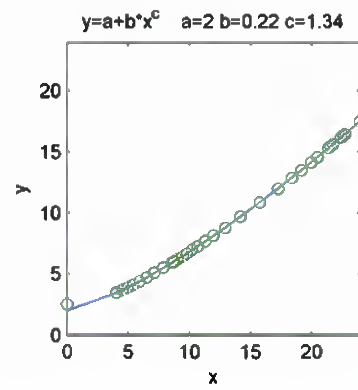
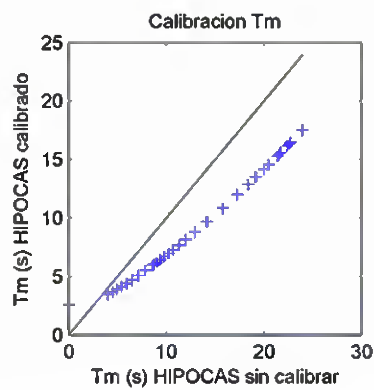
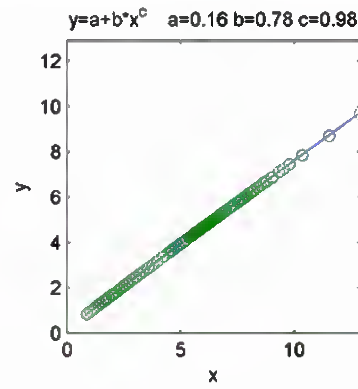
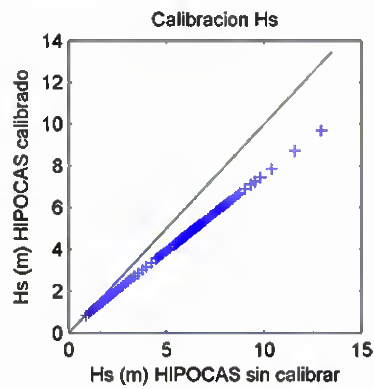
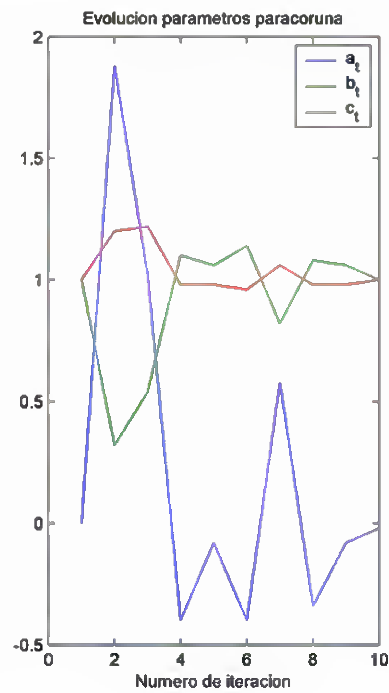
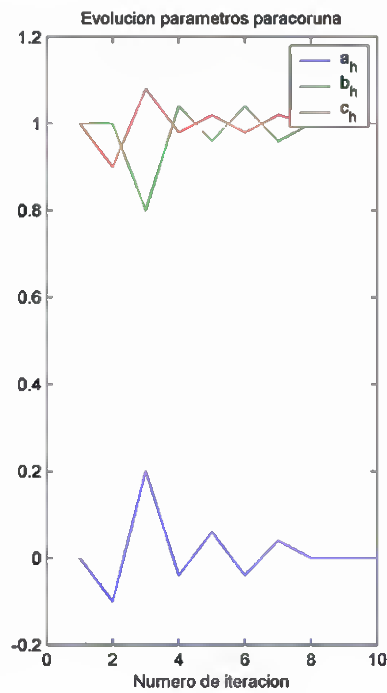


## A CORUÑA



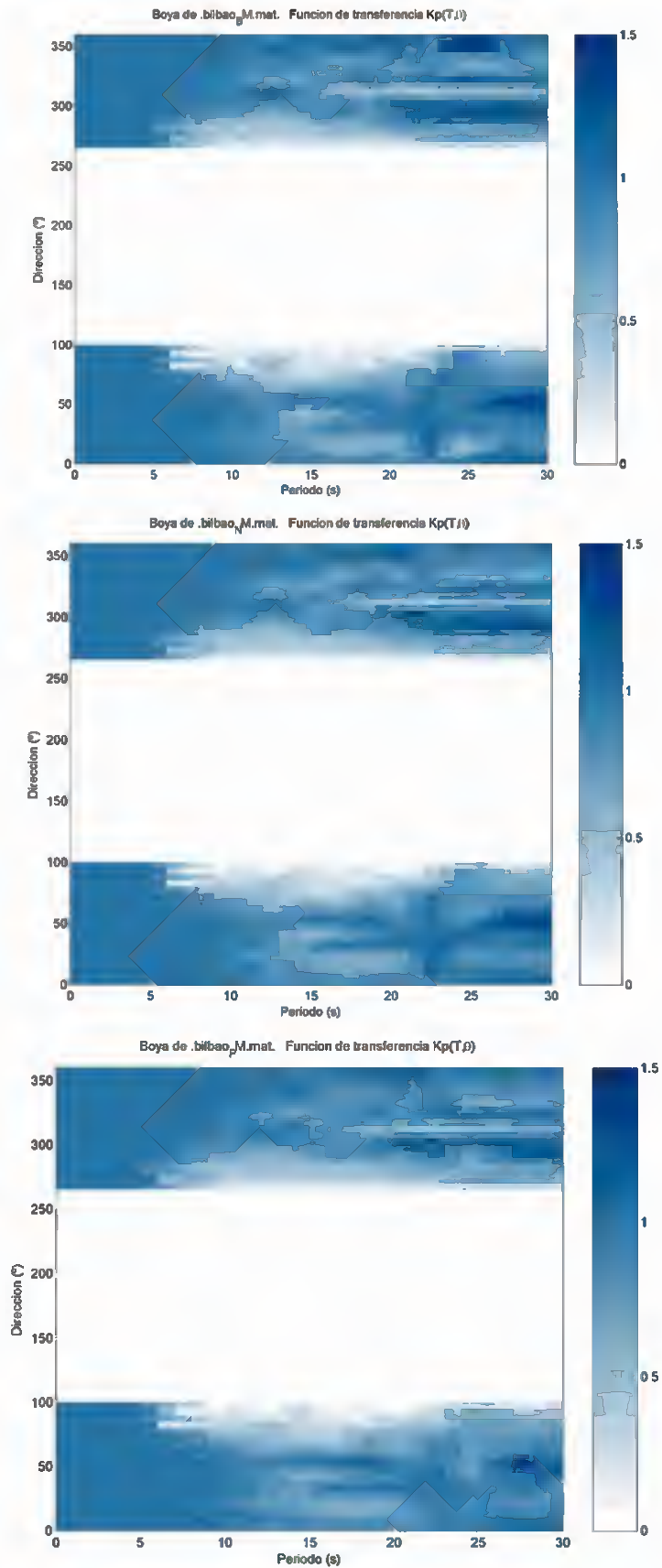


A CORUÑA



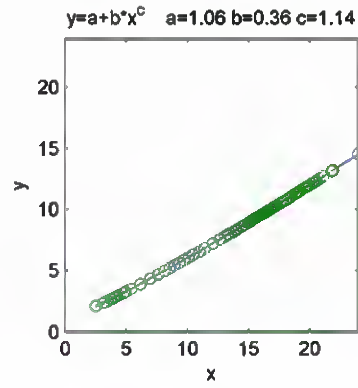
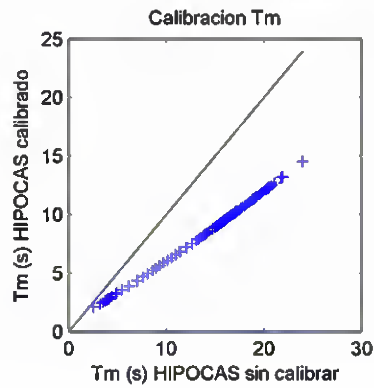
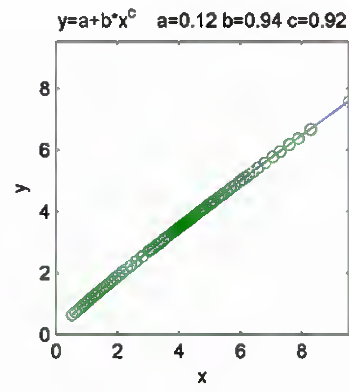
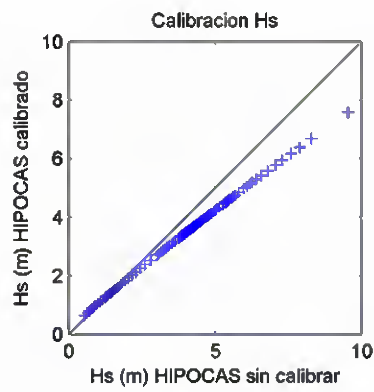
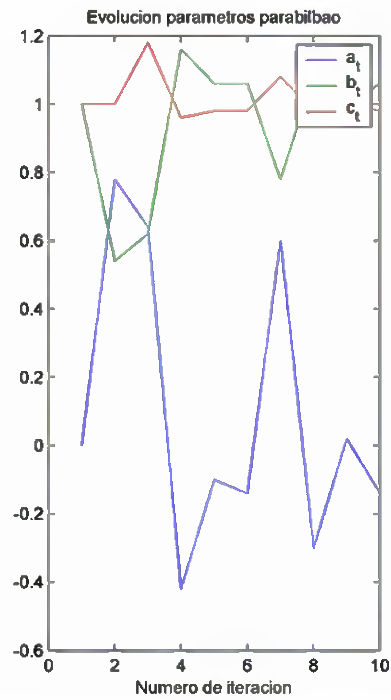
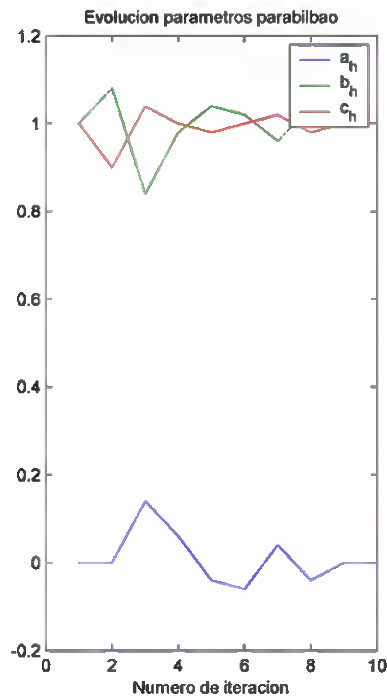


### BILBAO



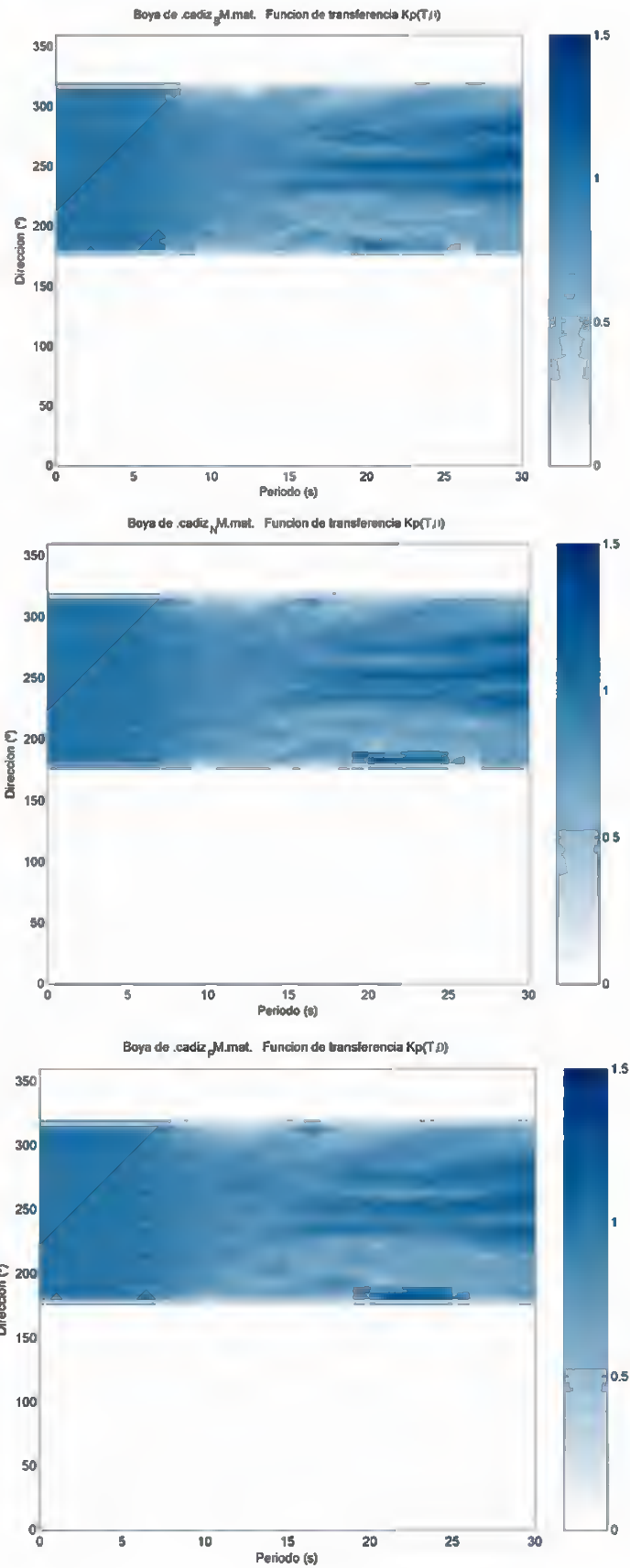


BILBAO



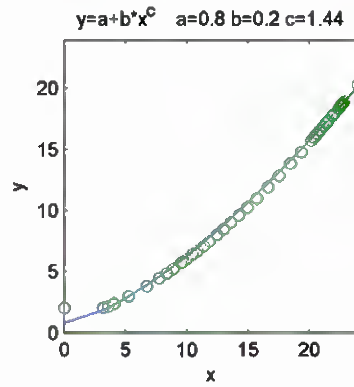
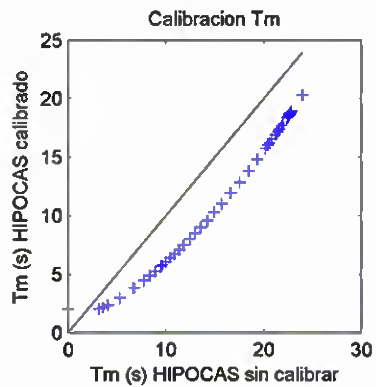
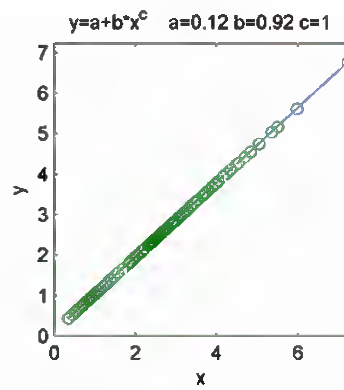
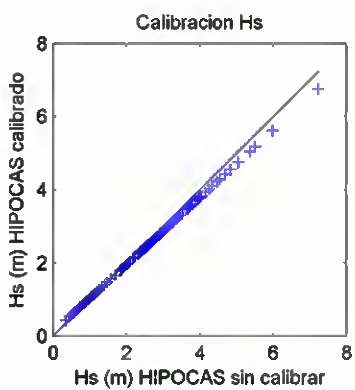
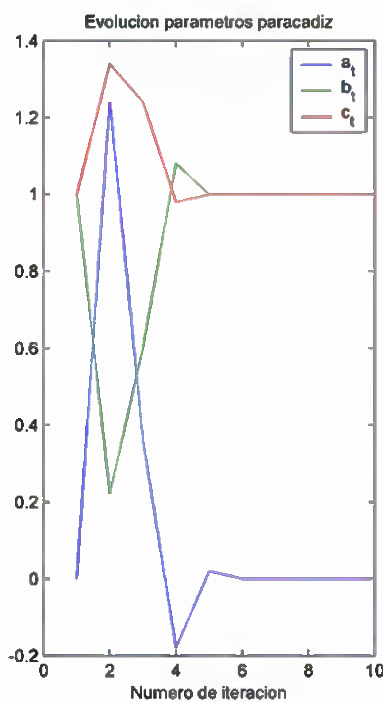
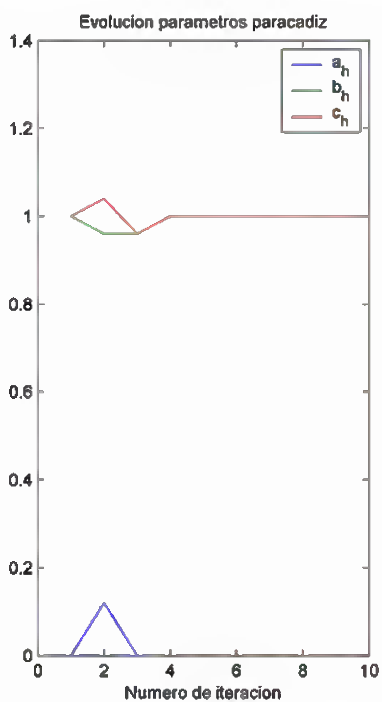


### CADIZ



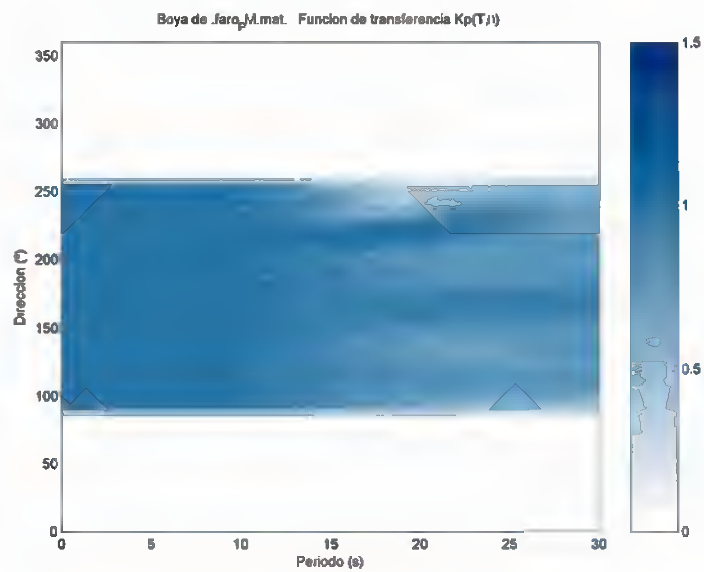
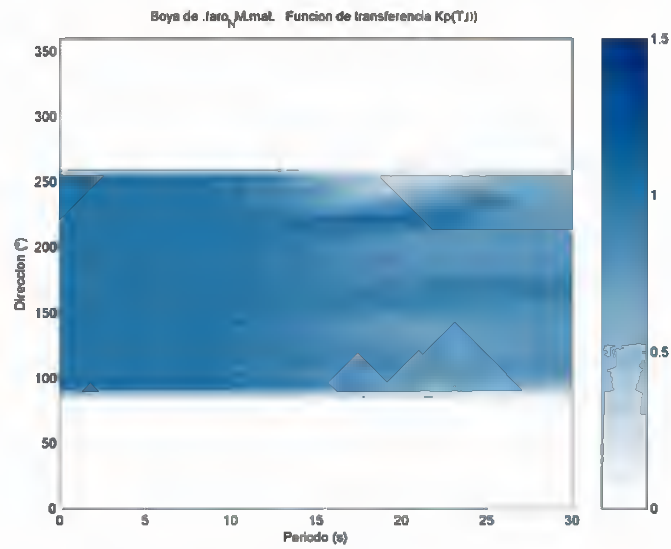
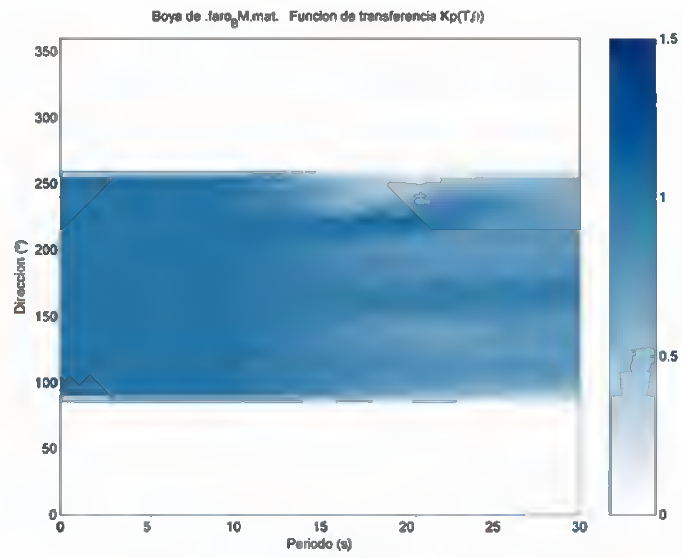


CADIZ



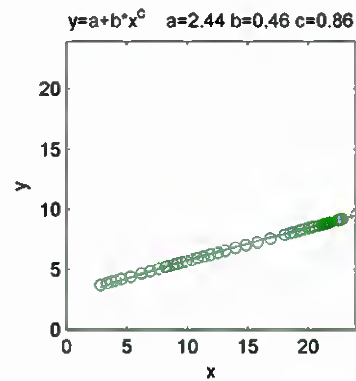
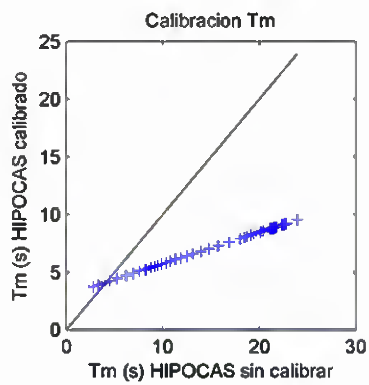
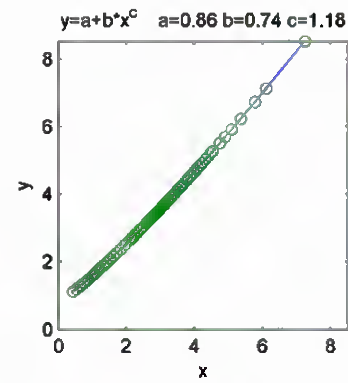
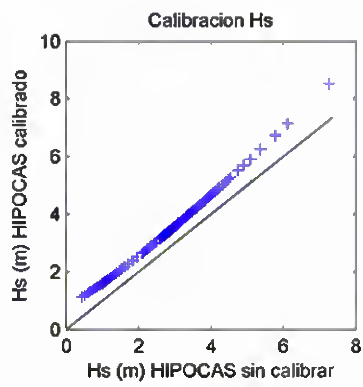
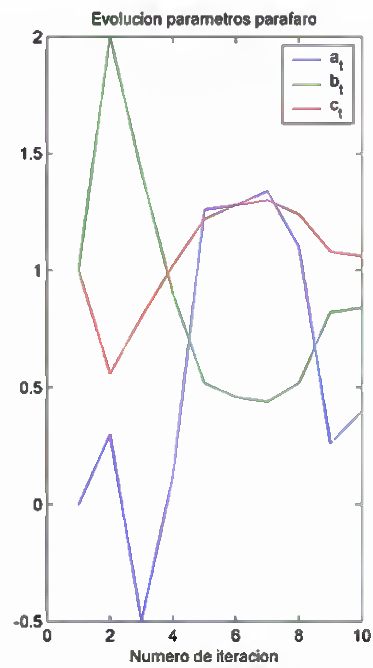
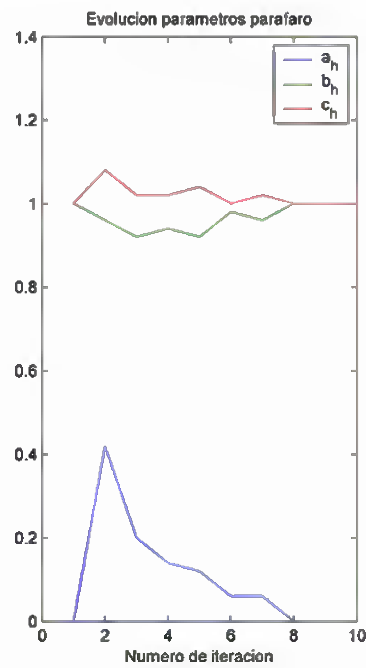


## FARO





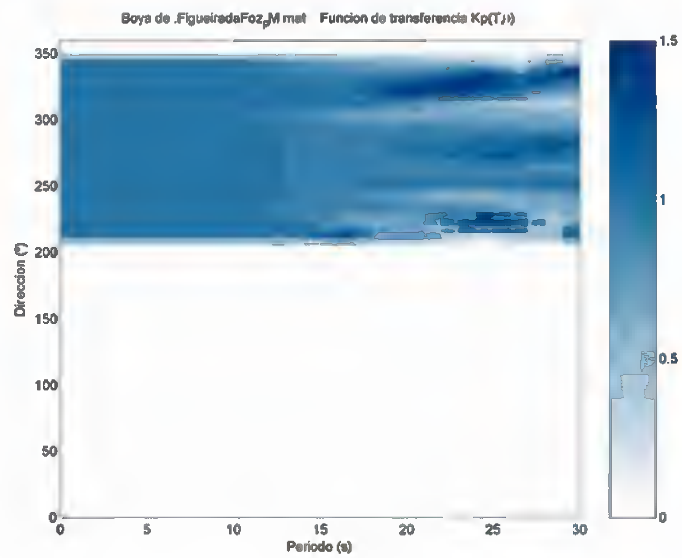
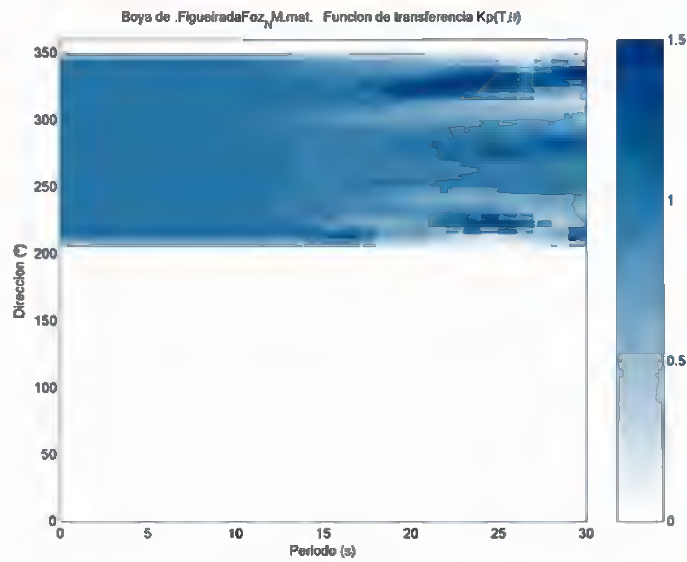
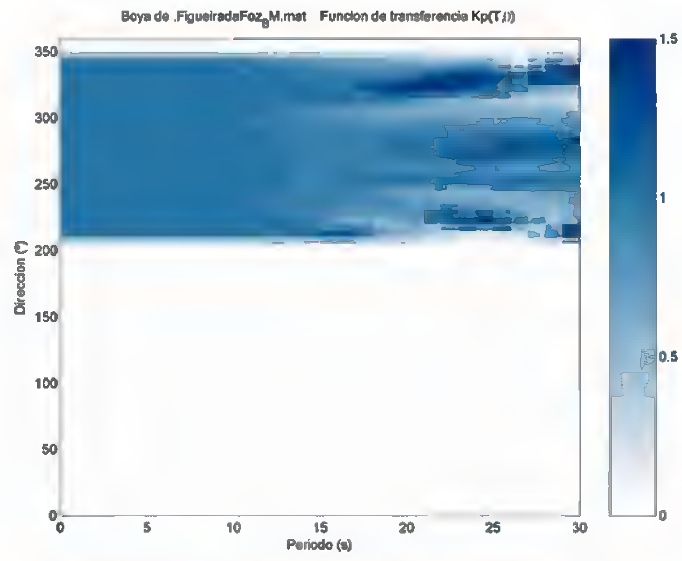
FARO





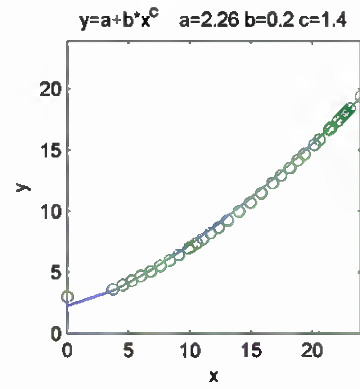
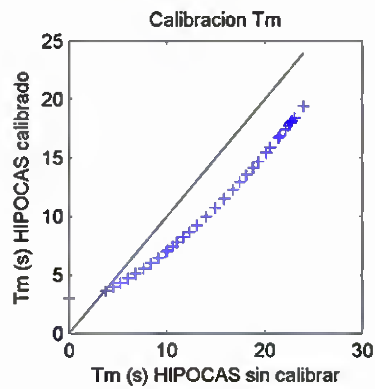
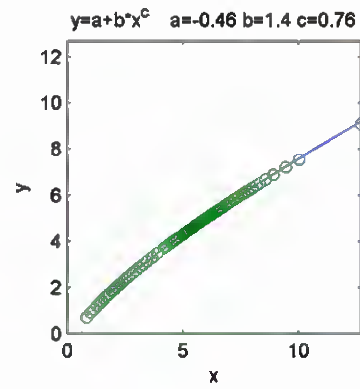
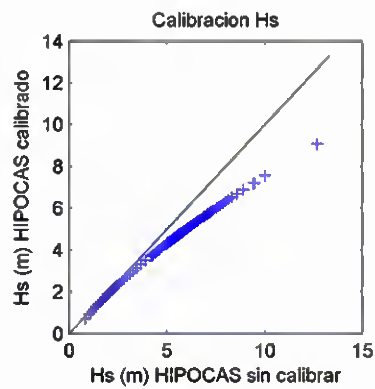
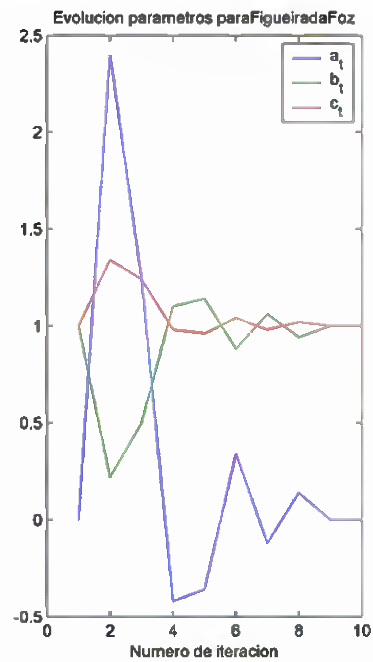
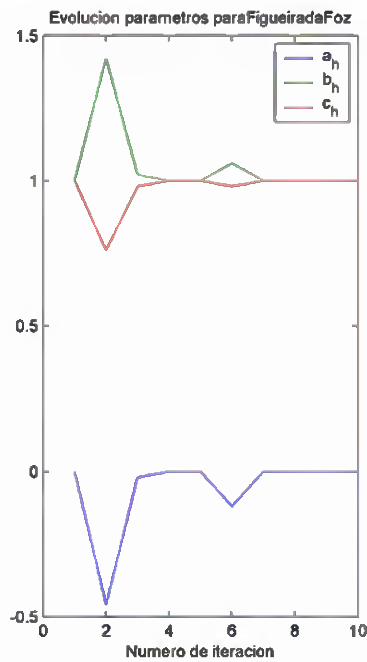


### FIGUEIRA DA FOZ



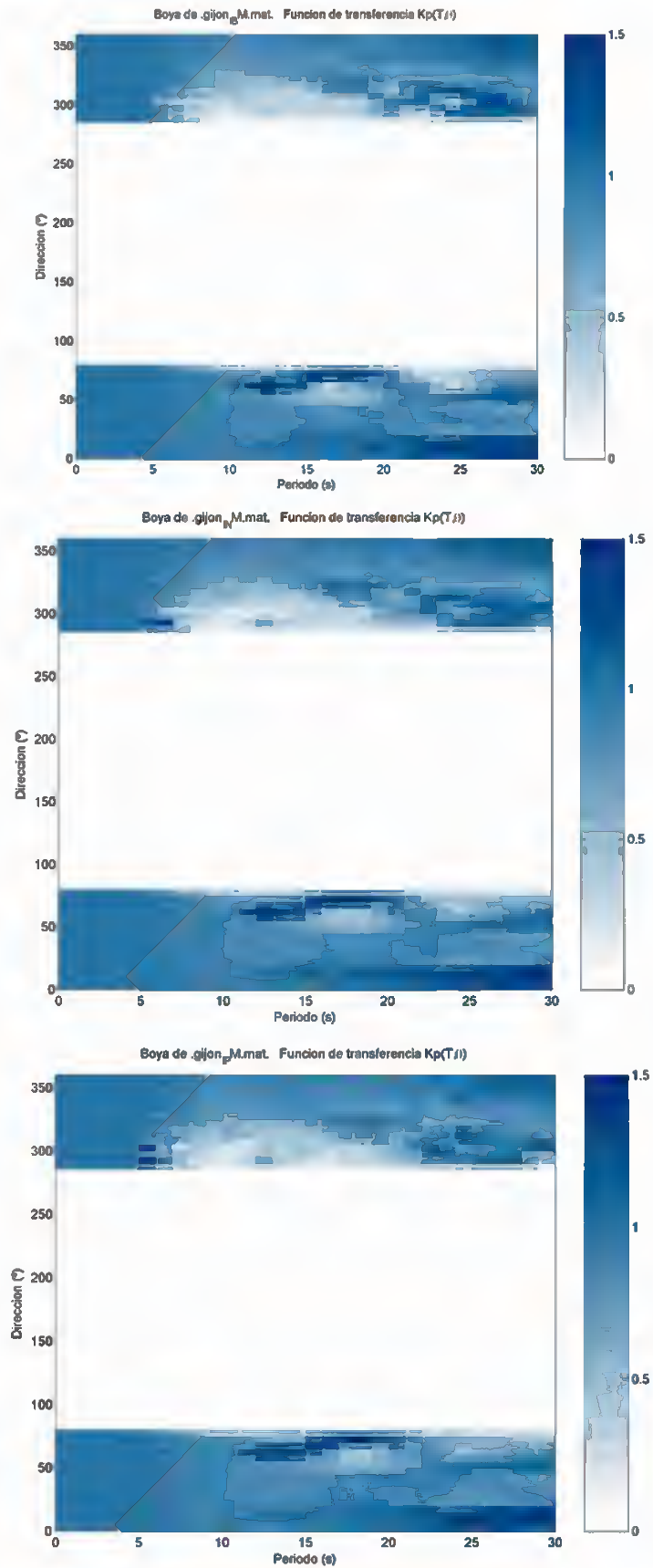


FIGUEIRA DA FOZ



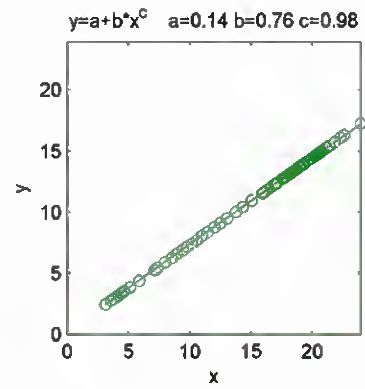
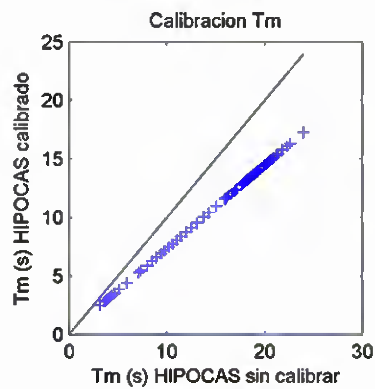
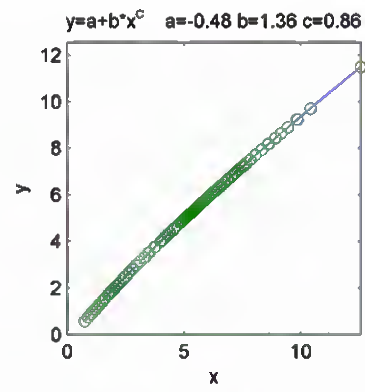
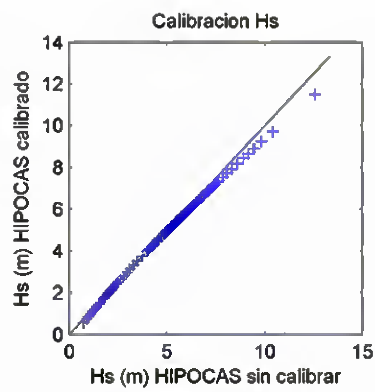
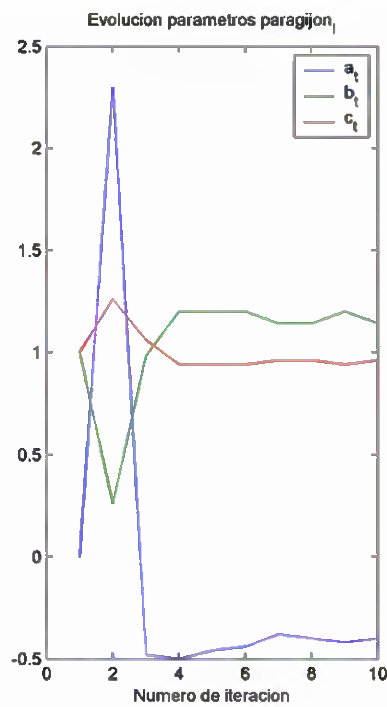
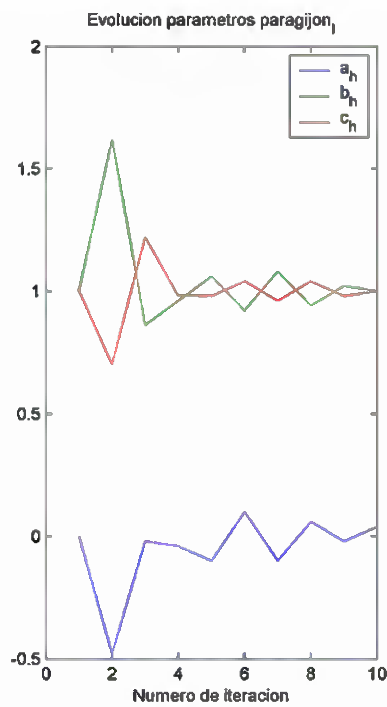


### GIJON



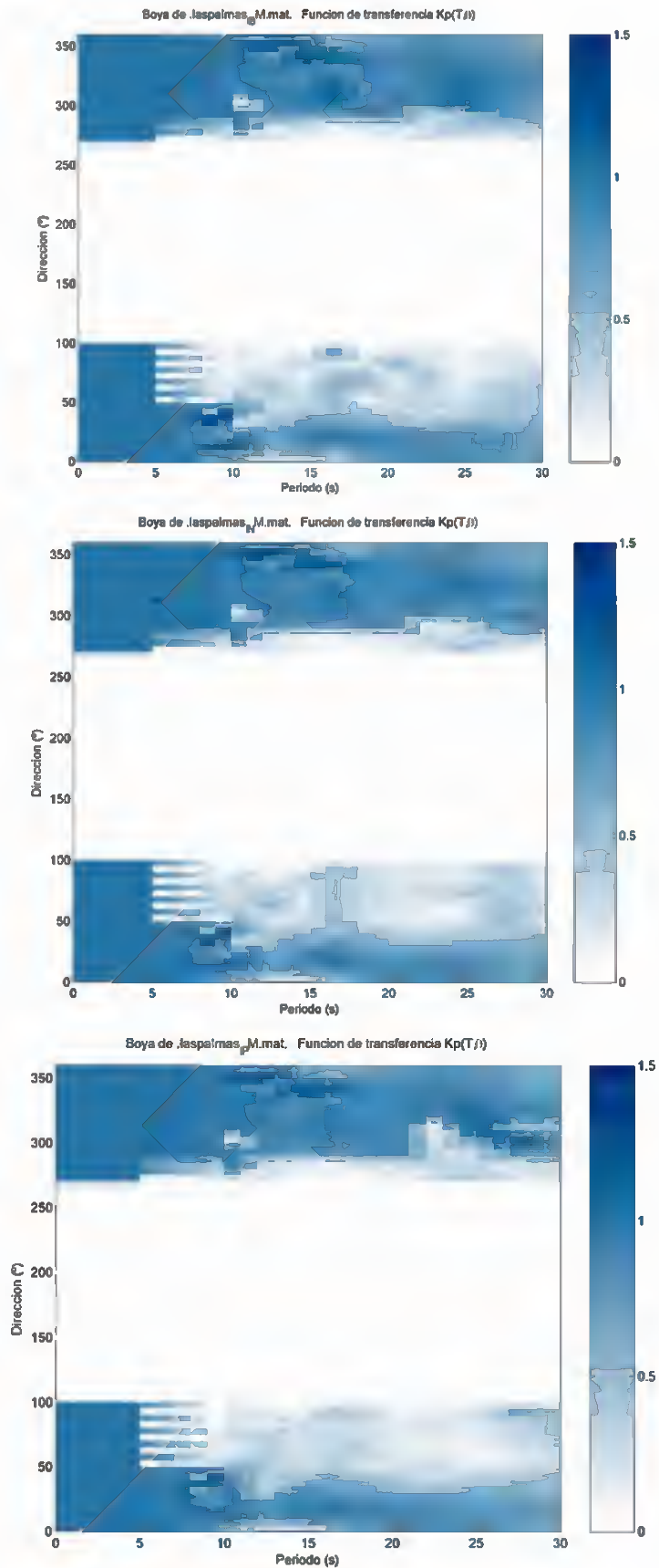


GIJON



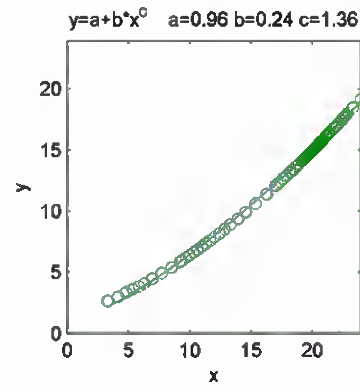
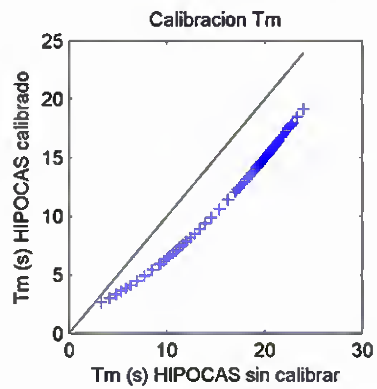
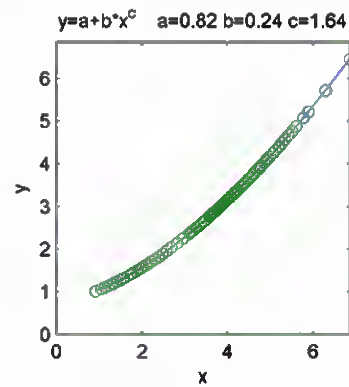
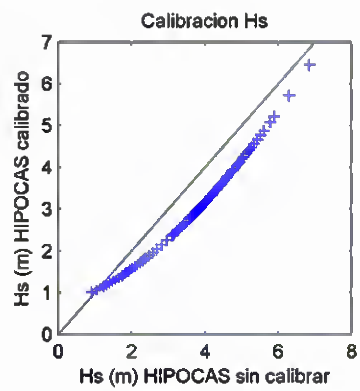
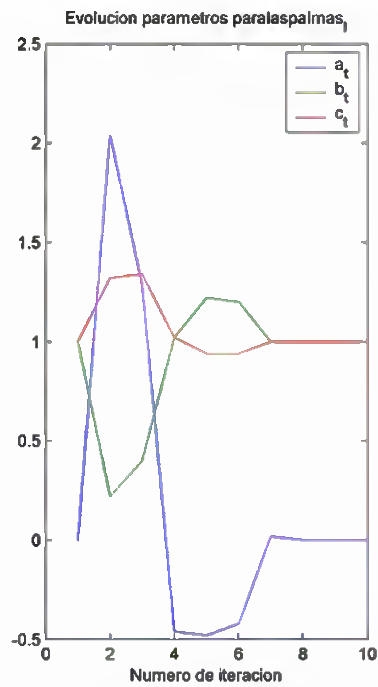
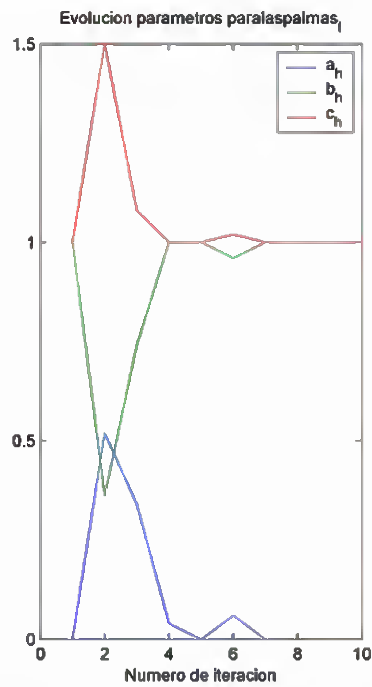


### LAS PALMAS



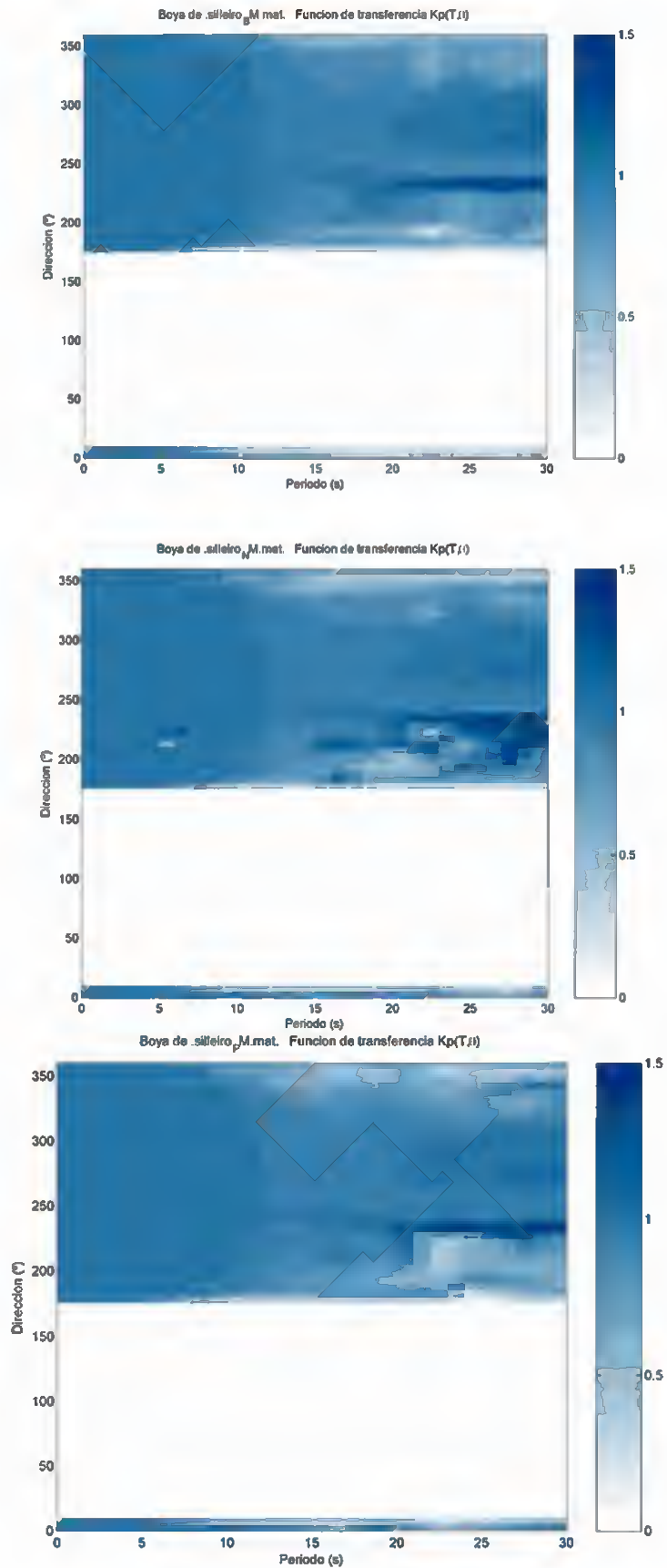


### LAS PALMAS



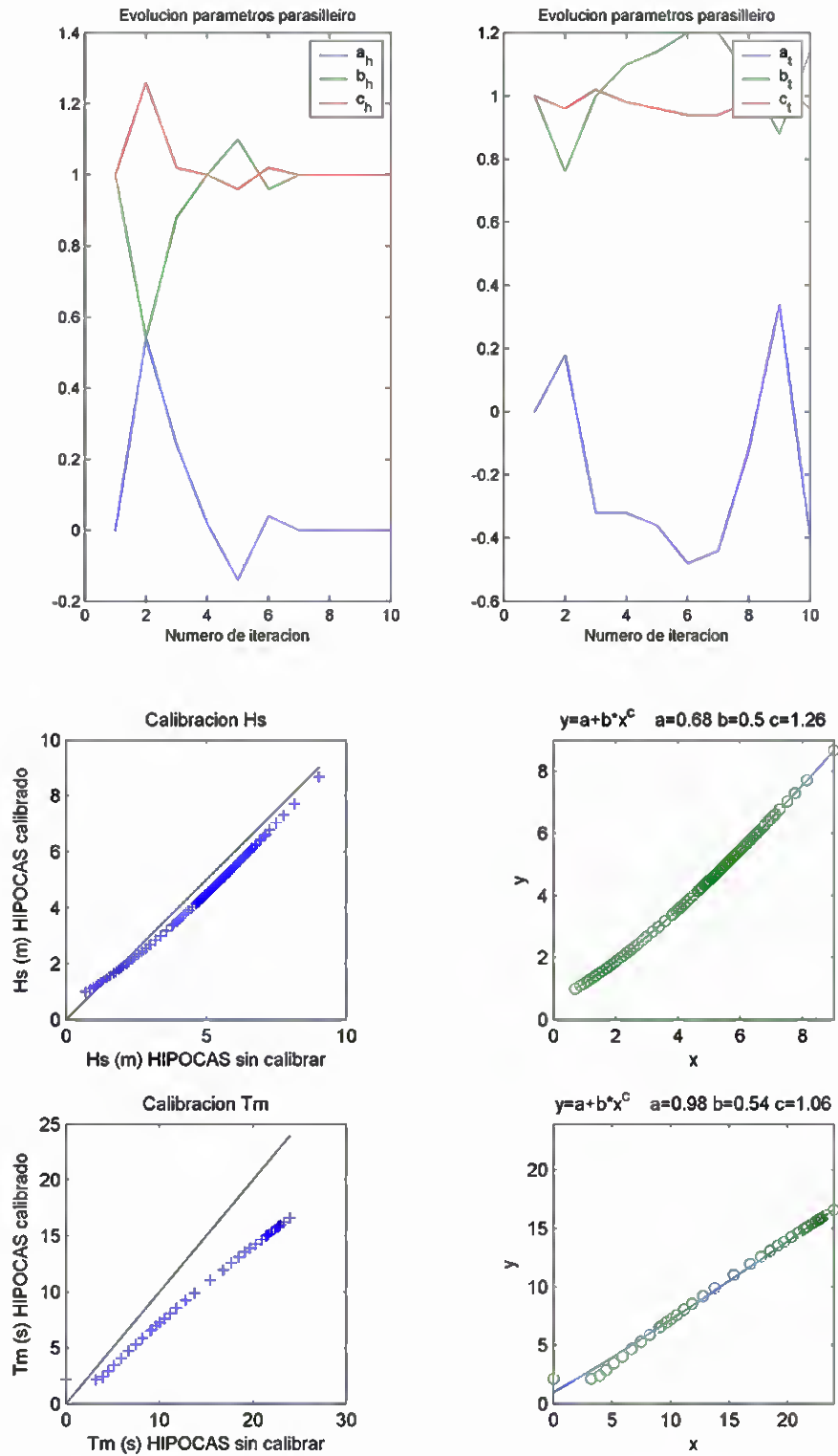


### SILLEIRO





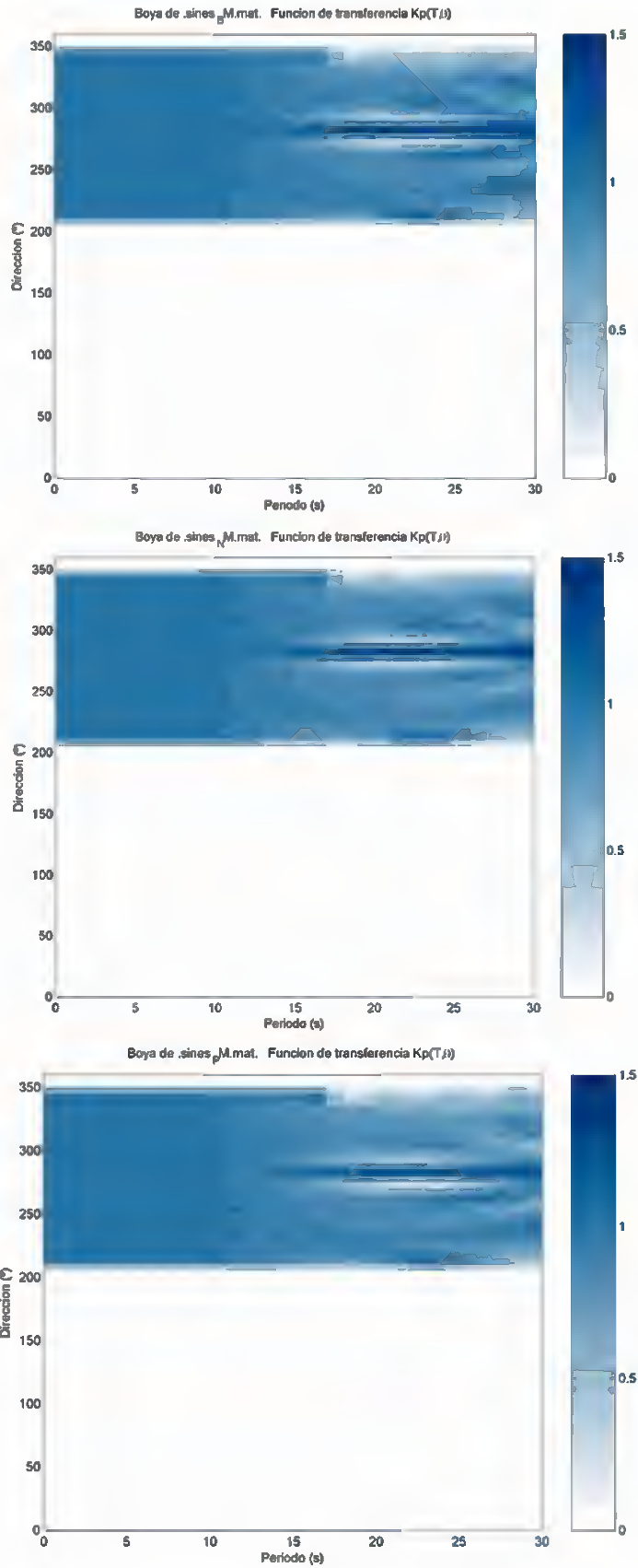
SILLEIRO





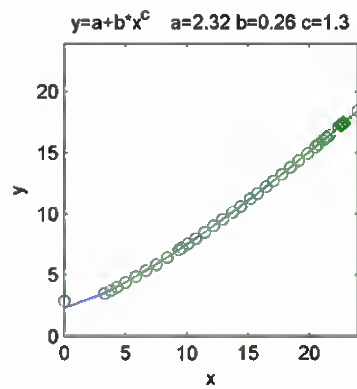
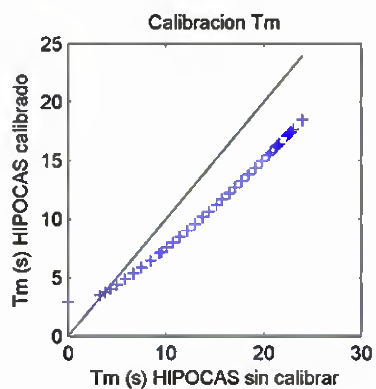
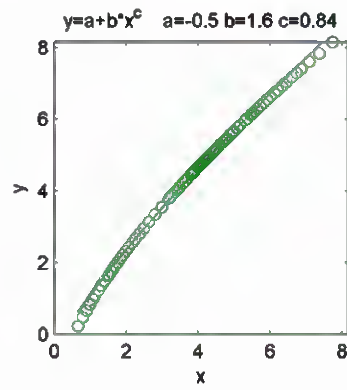
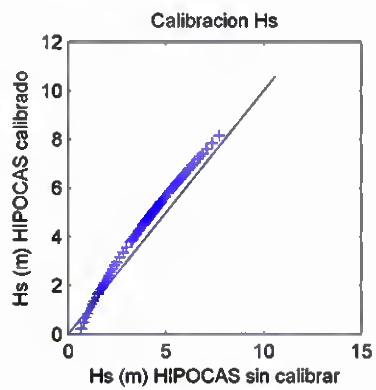
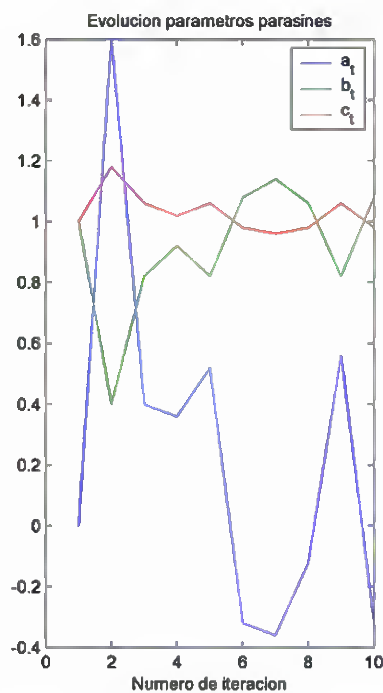
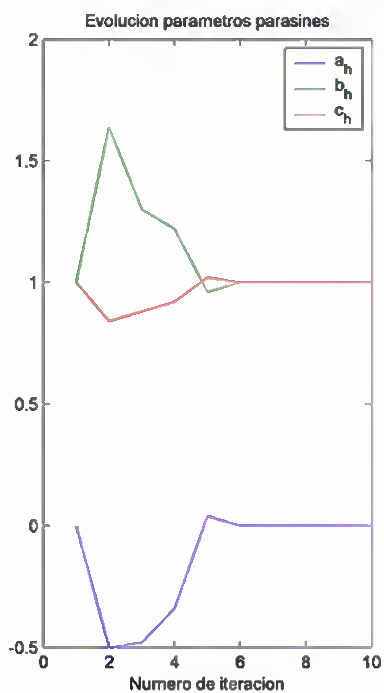


### SINES



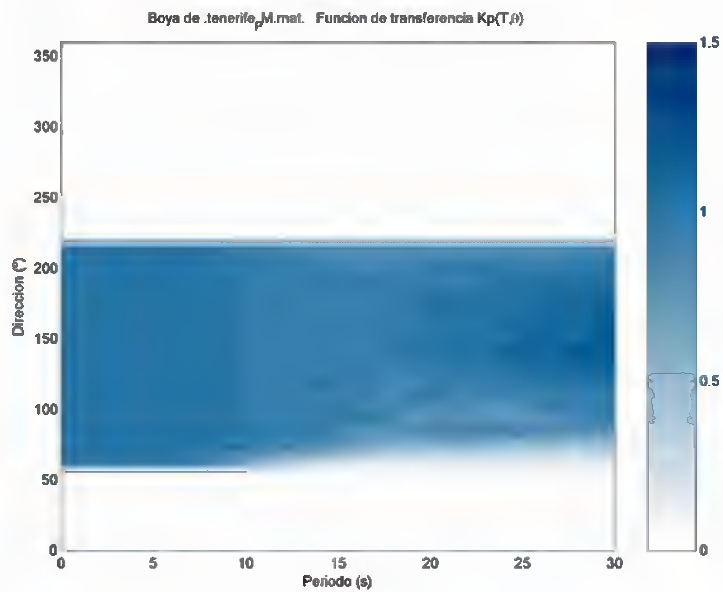
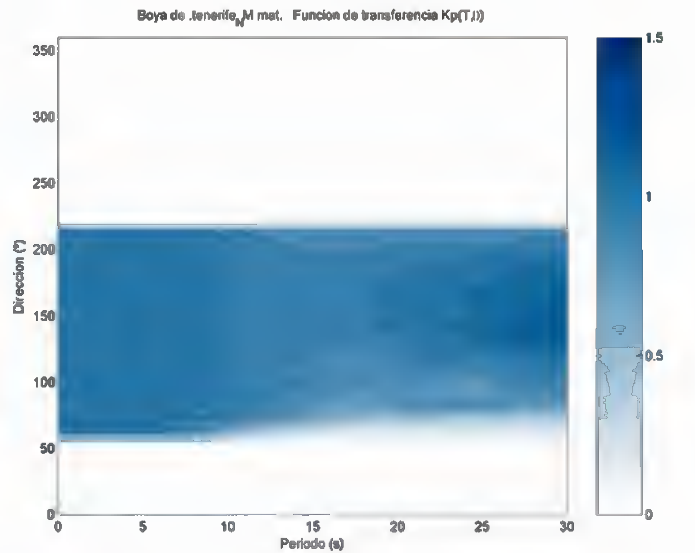
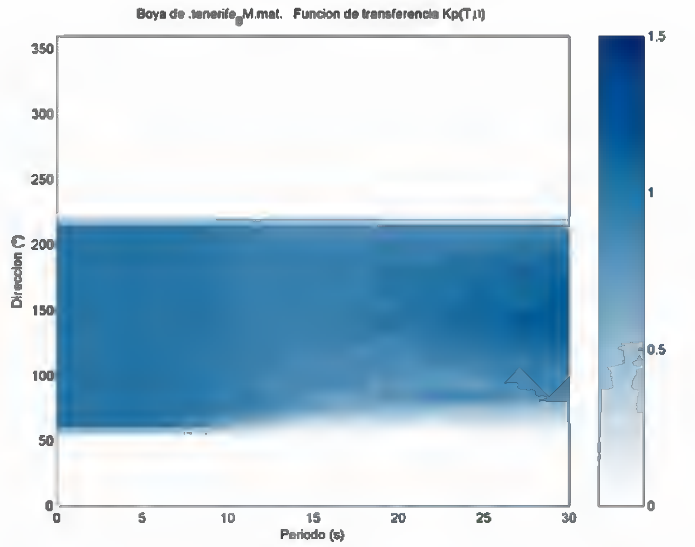


SINES



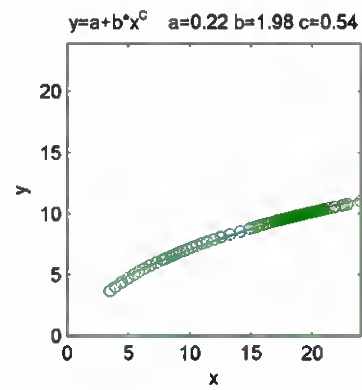
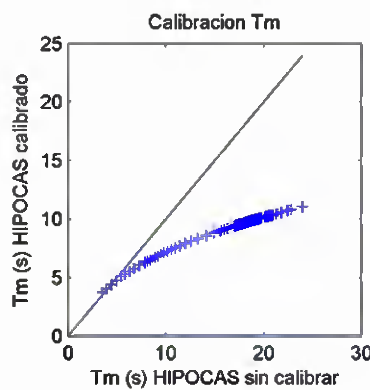
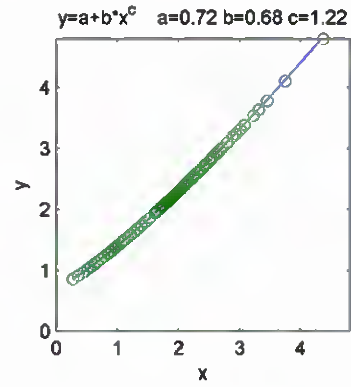
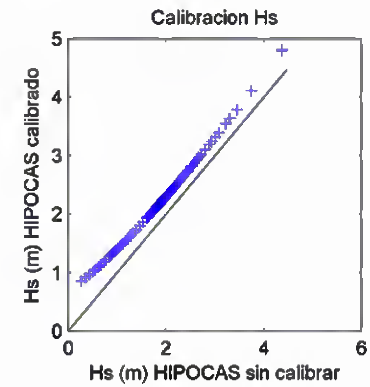
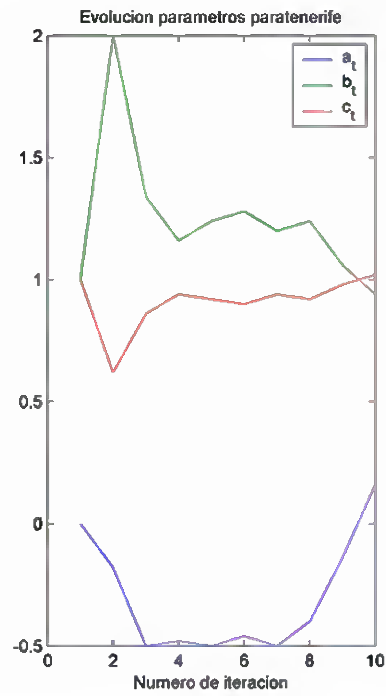
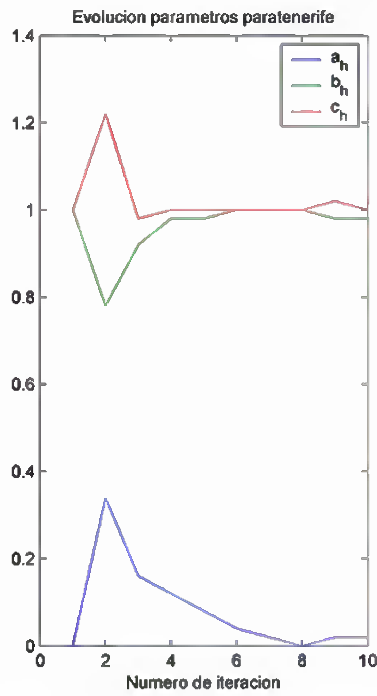


### TENERIFE





TENERIFE



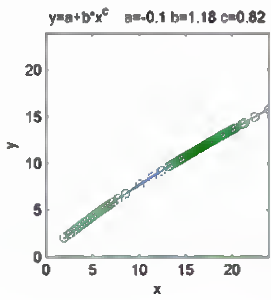
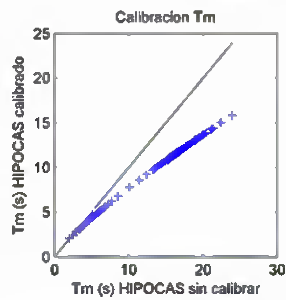
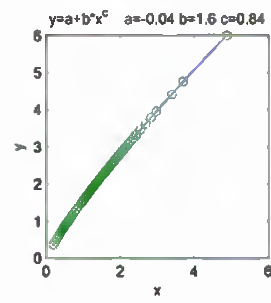
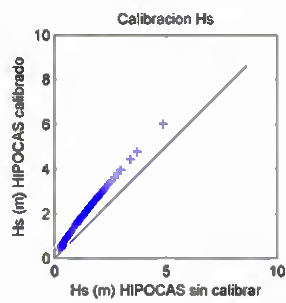
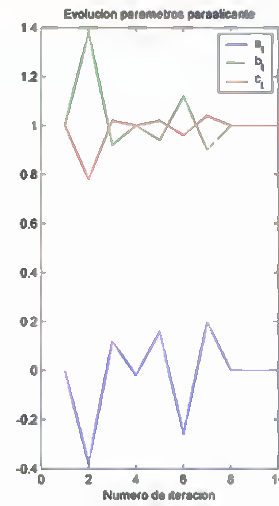
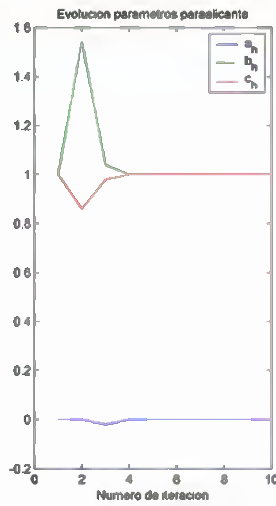
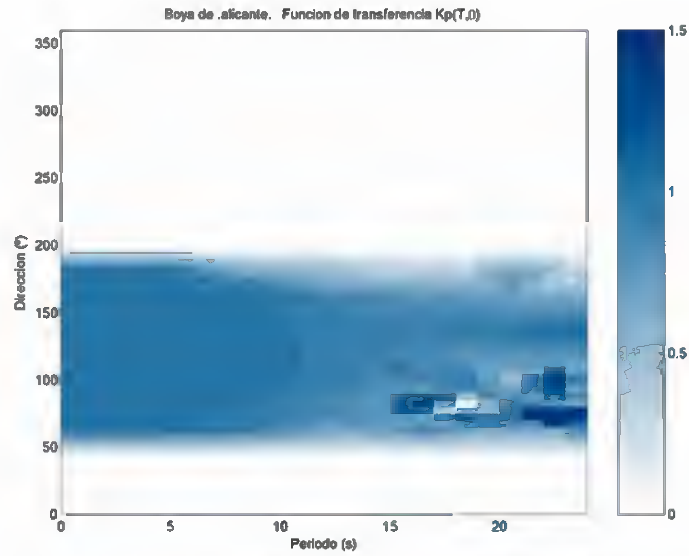


## MEDITERRÁNEO



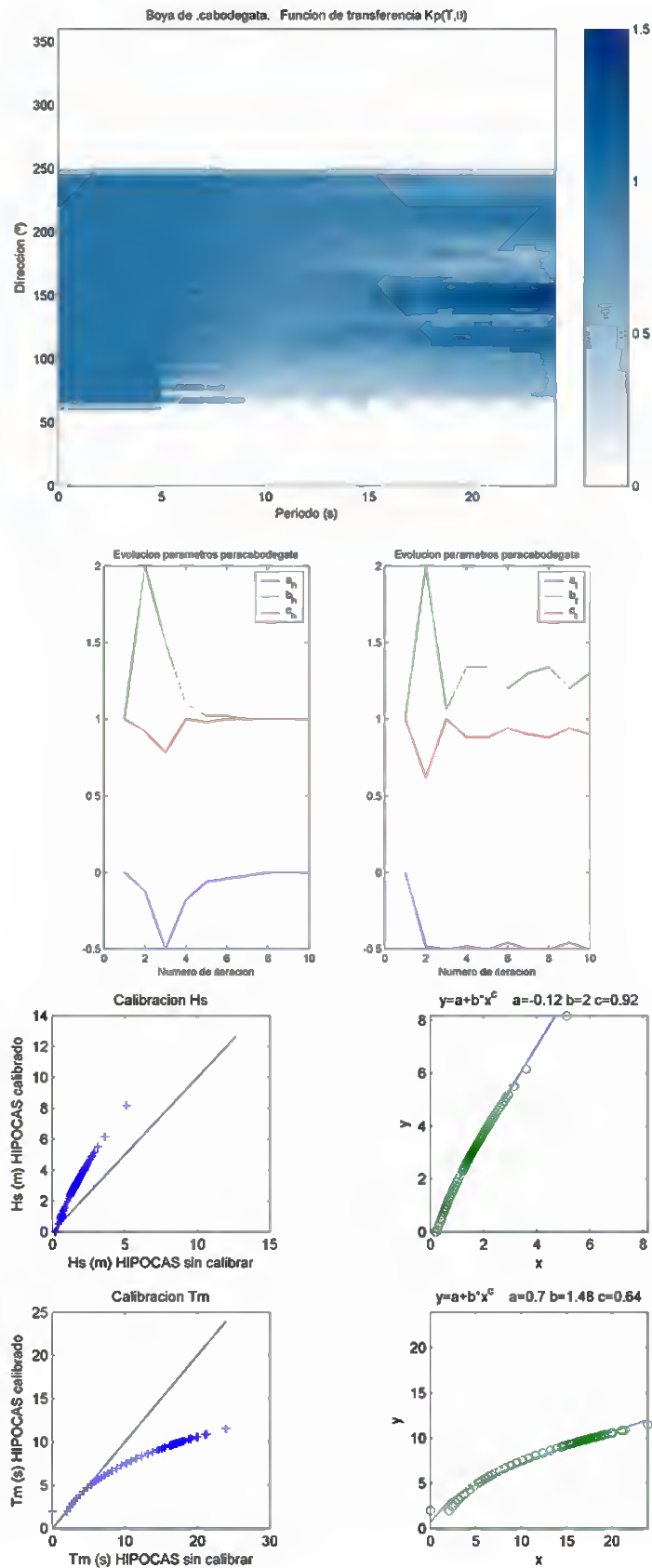


### ALICANTE



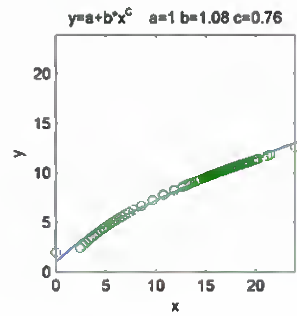
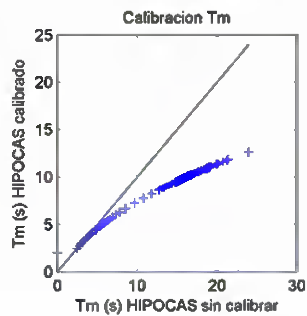
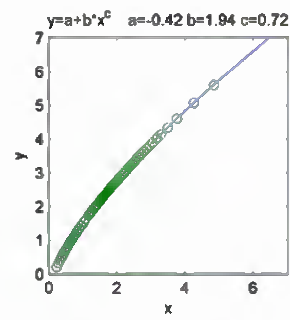
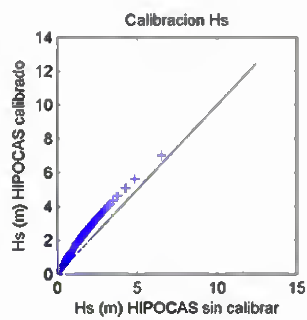
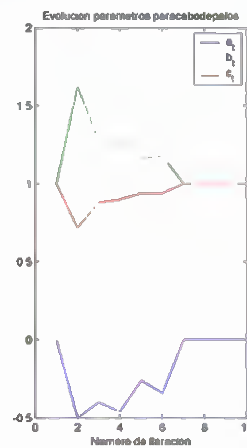
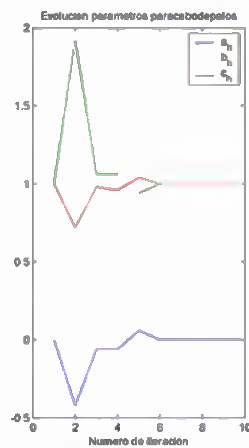
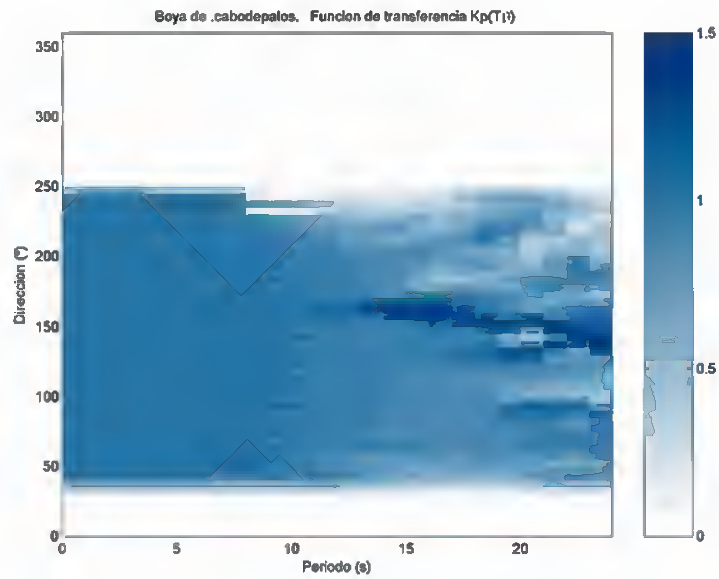


### CABO DE GATA





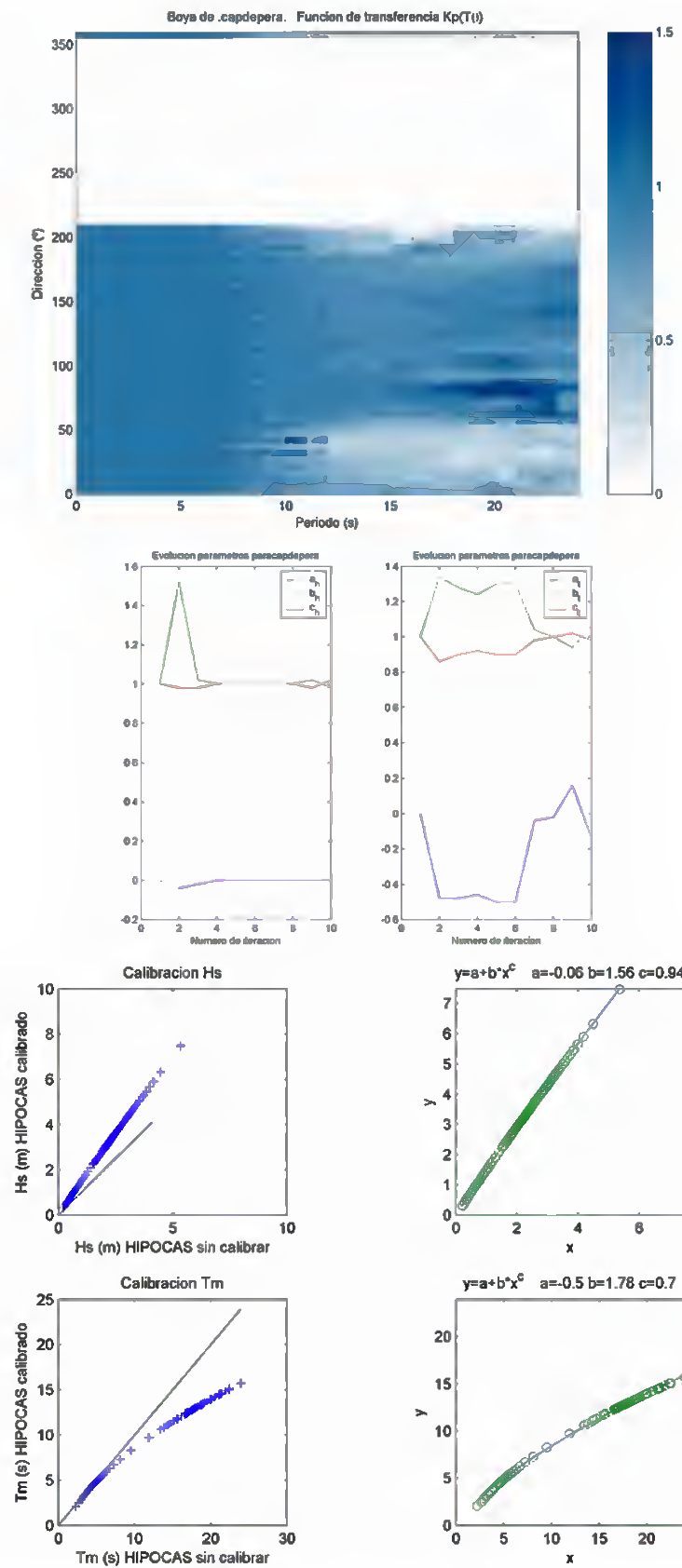
### CABO DE PALOS





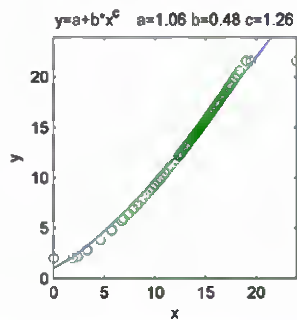
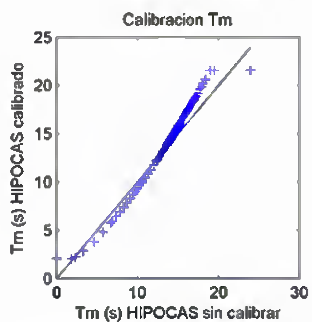
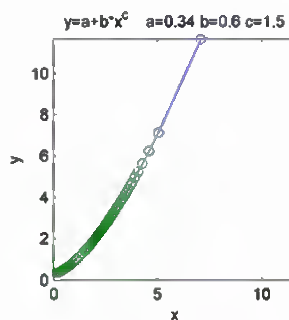
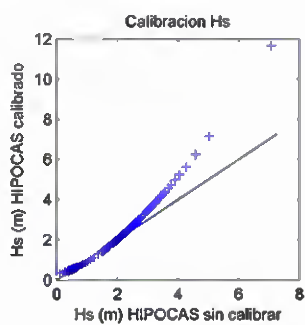
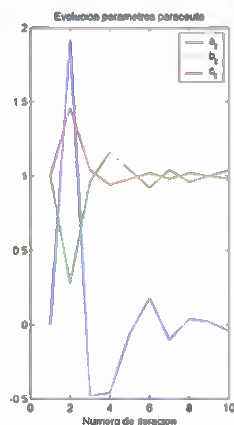
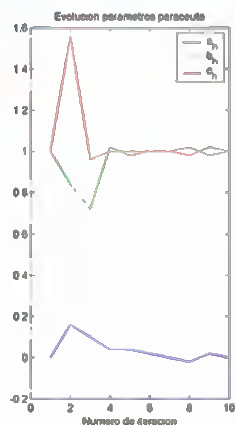
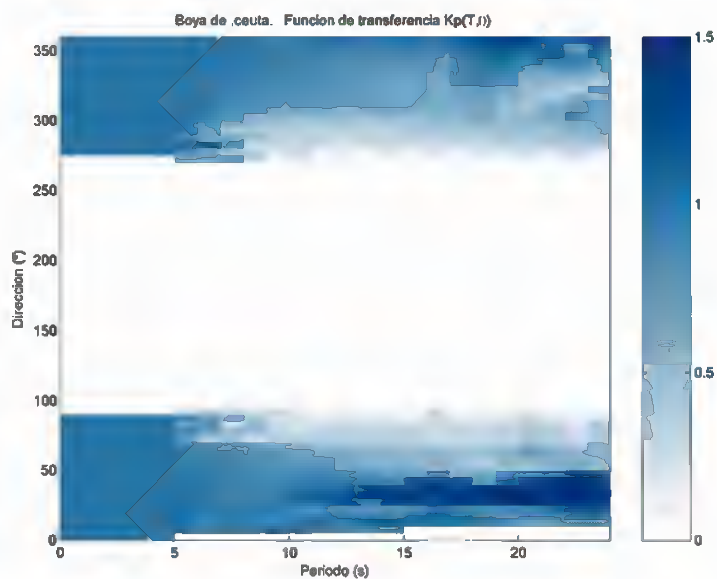


### CAP DE PERA



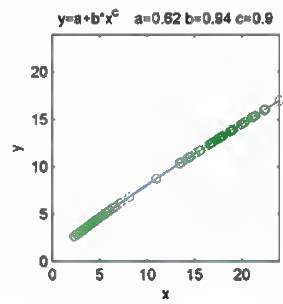
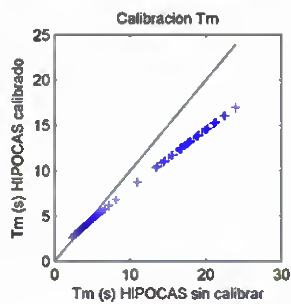
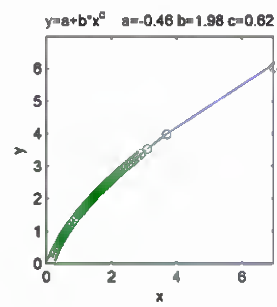
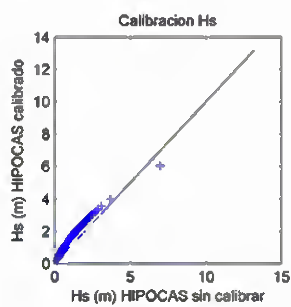
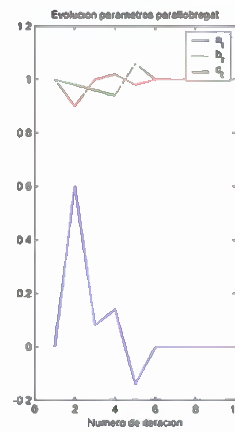
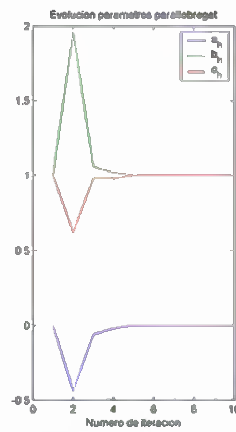
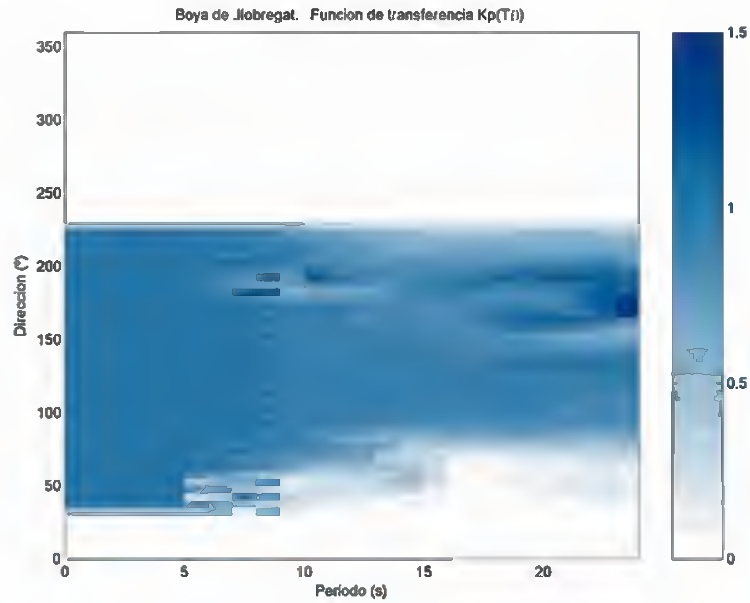


### CEUTA



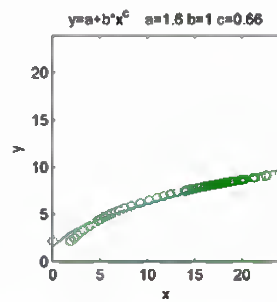
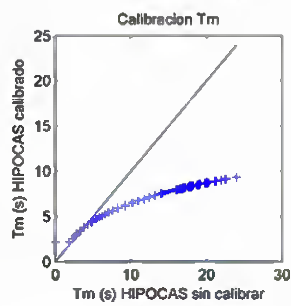
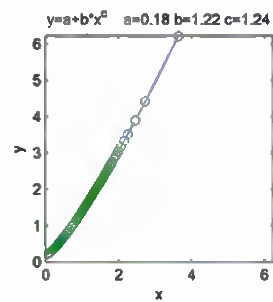
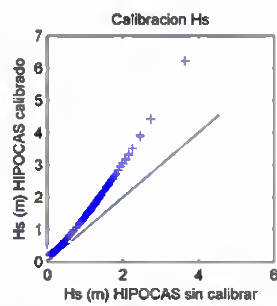
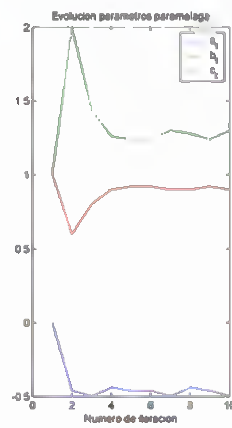
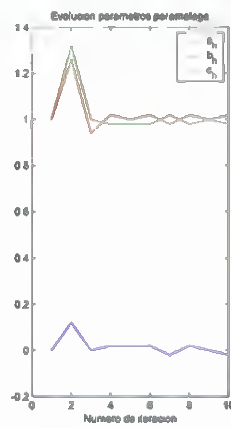
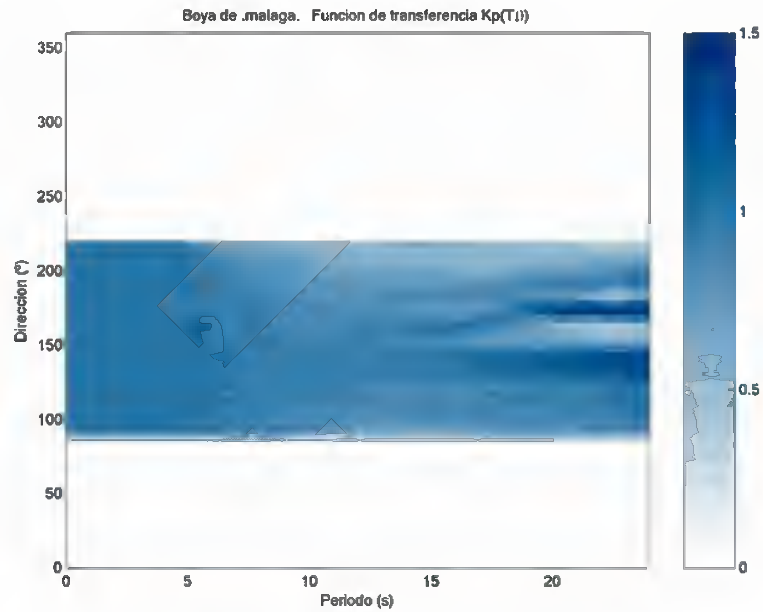


### LLOBREGAT



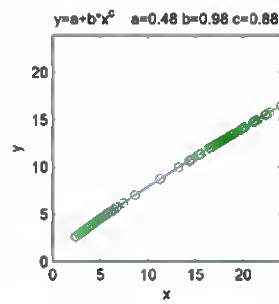
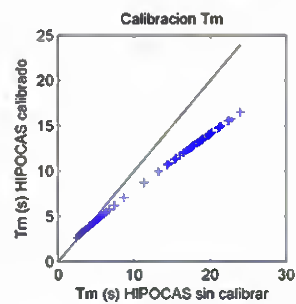
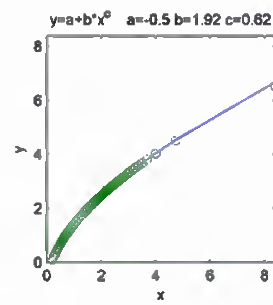
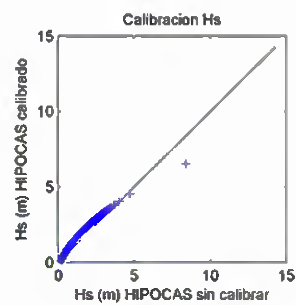
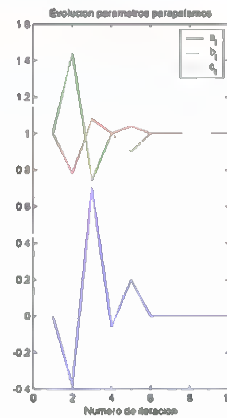
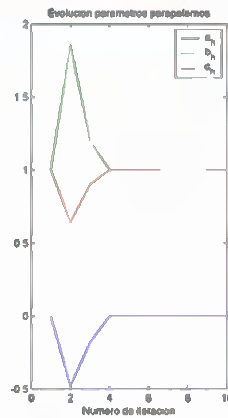
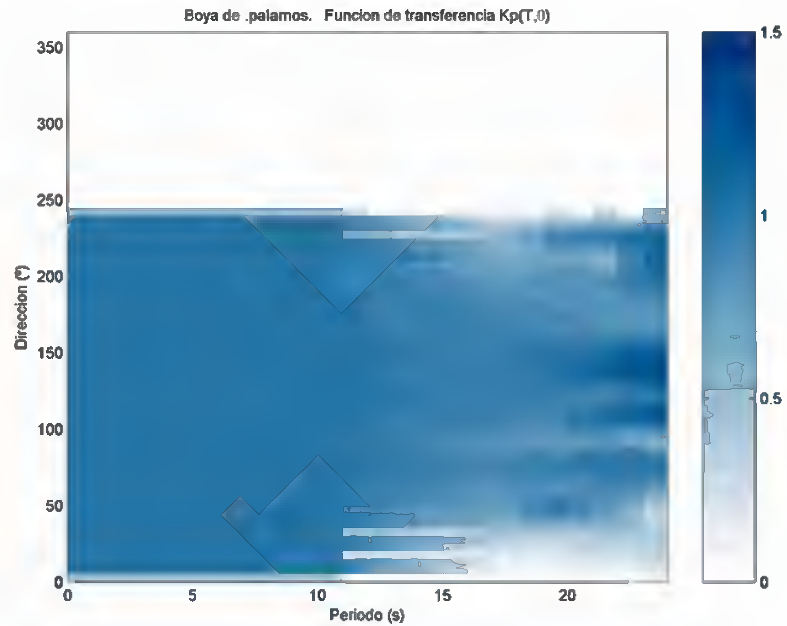


### MALAGA



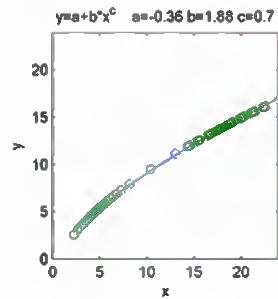
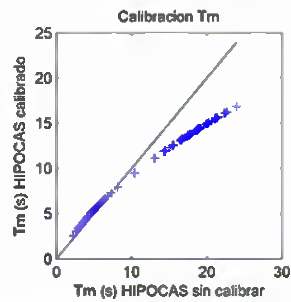
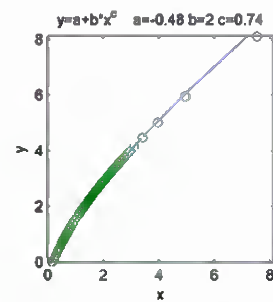
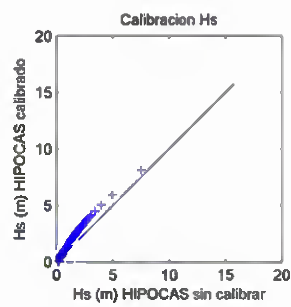
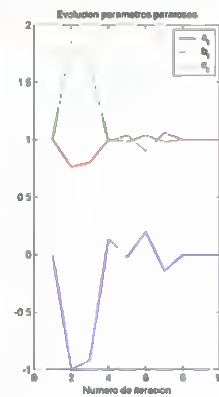
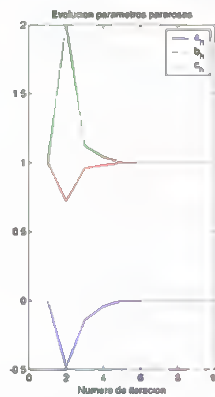
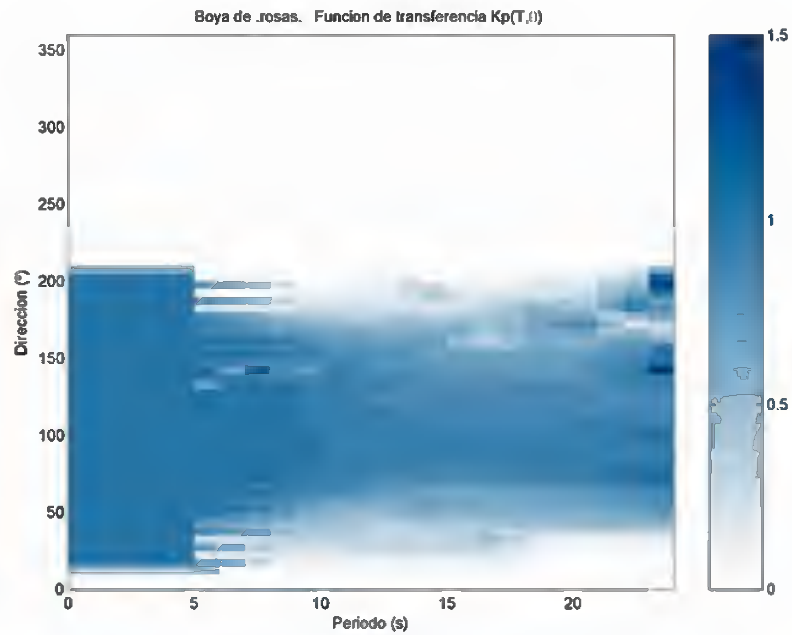


## PALAMOS



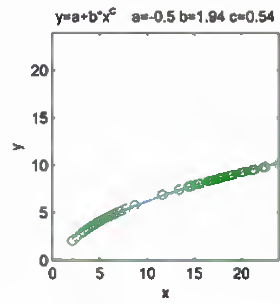
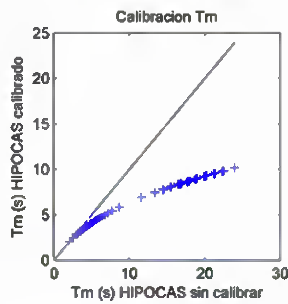
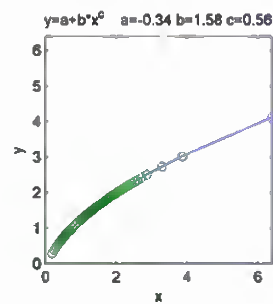
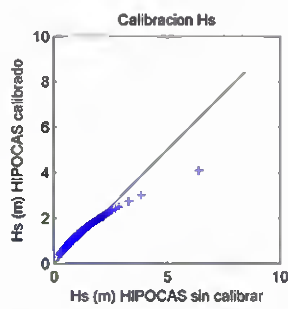
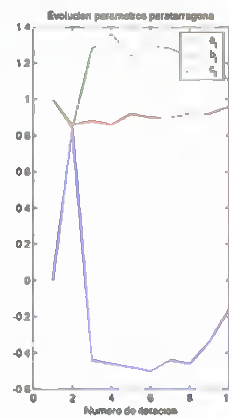
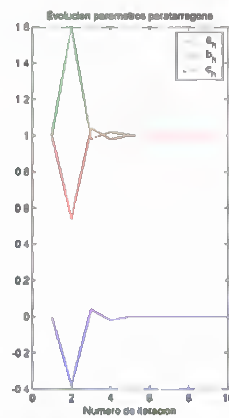
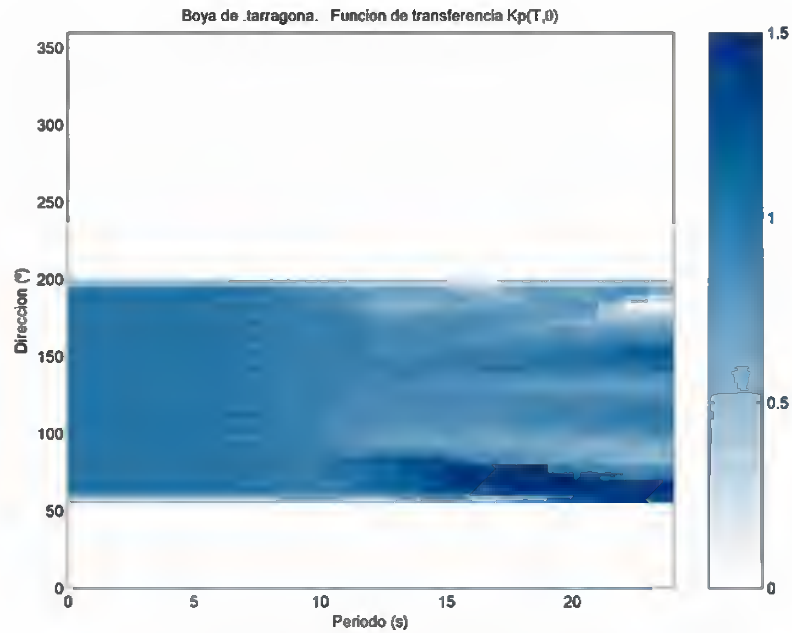


## ROSAS



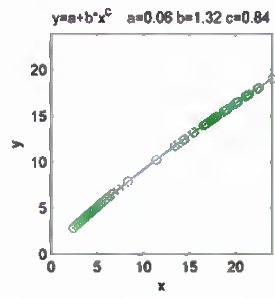
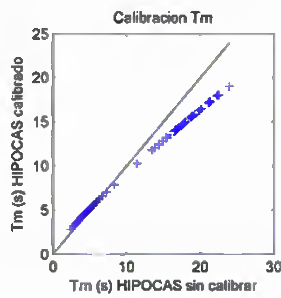
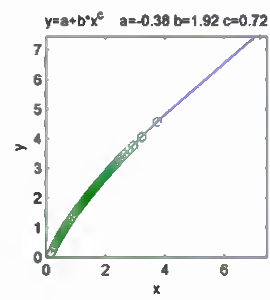
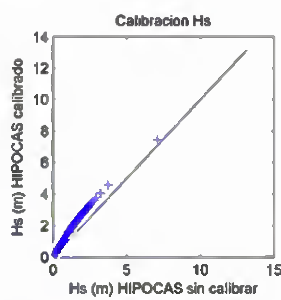
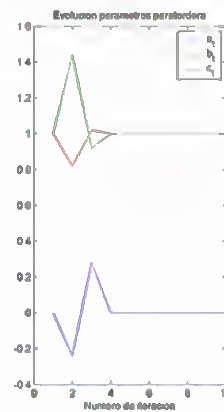
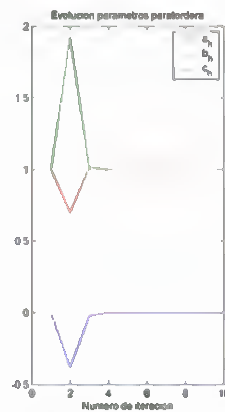
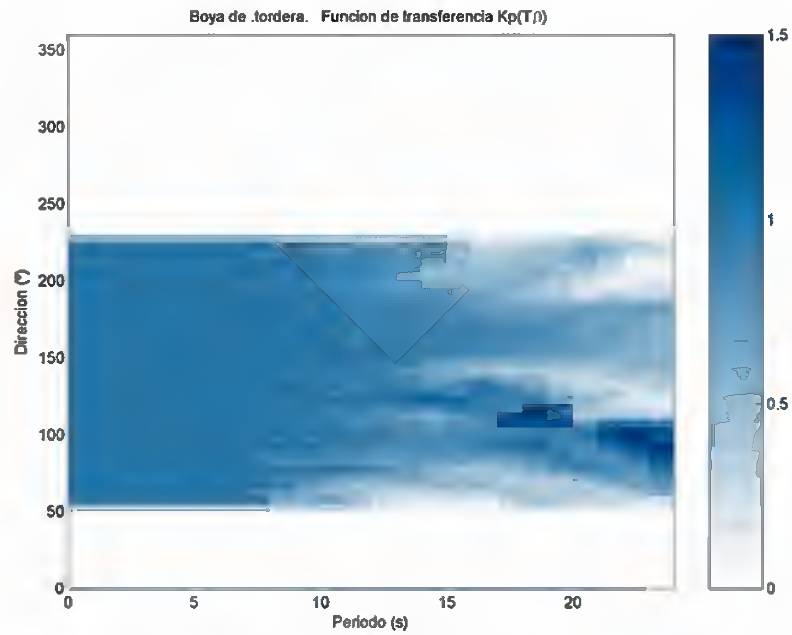


### TARRAGONA





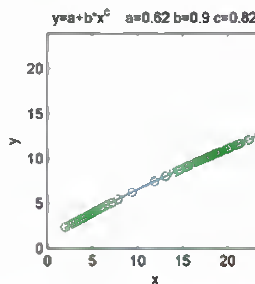
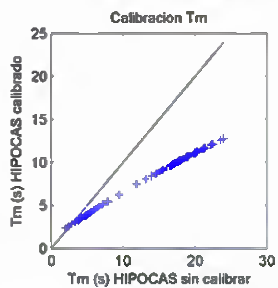
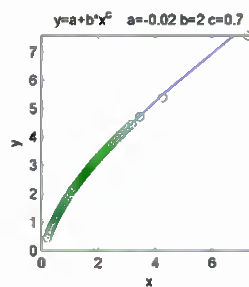
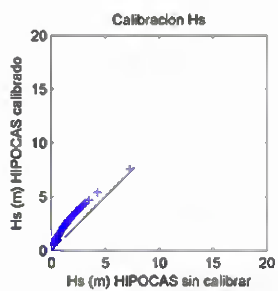
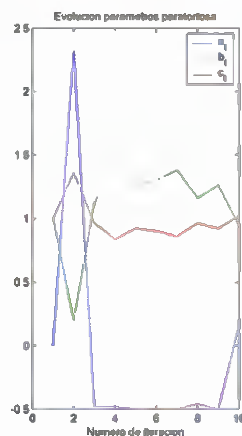
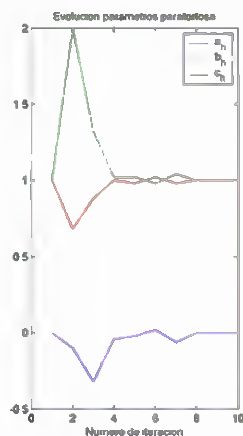
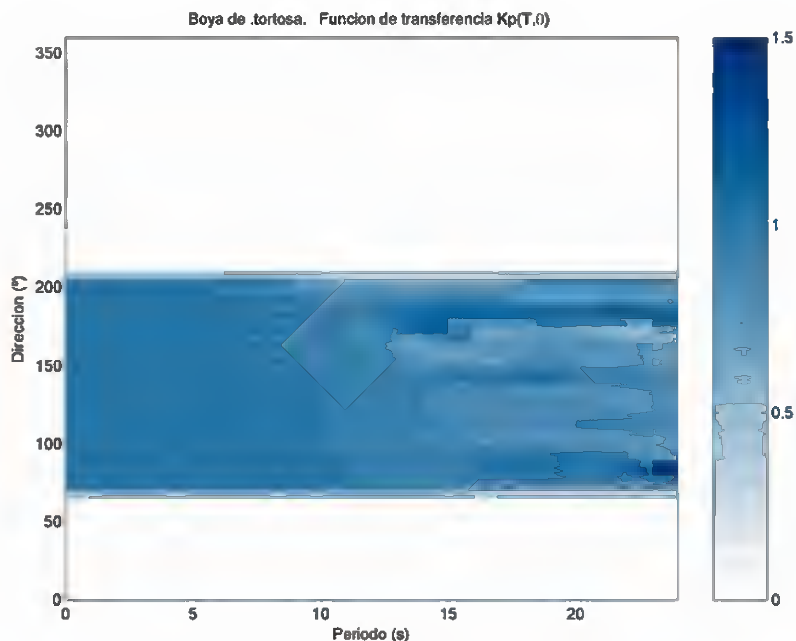
### TORDERA





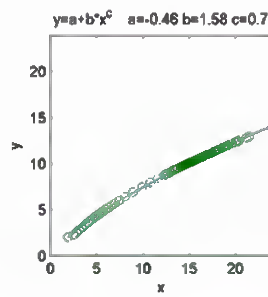
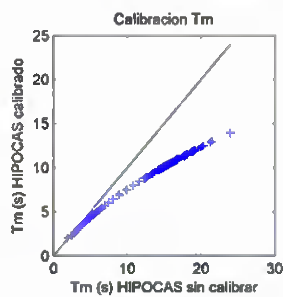
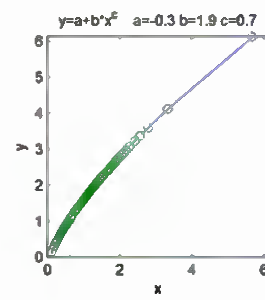
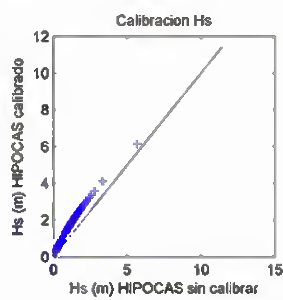
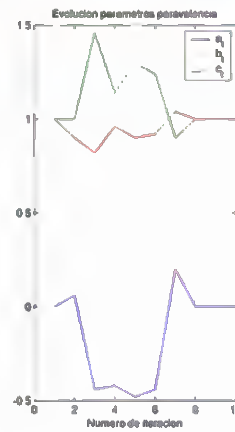
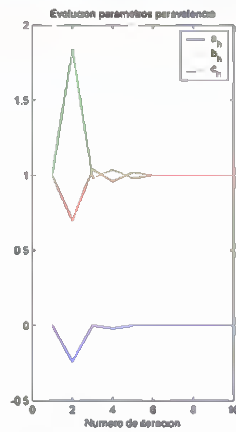
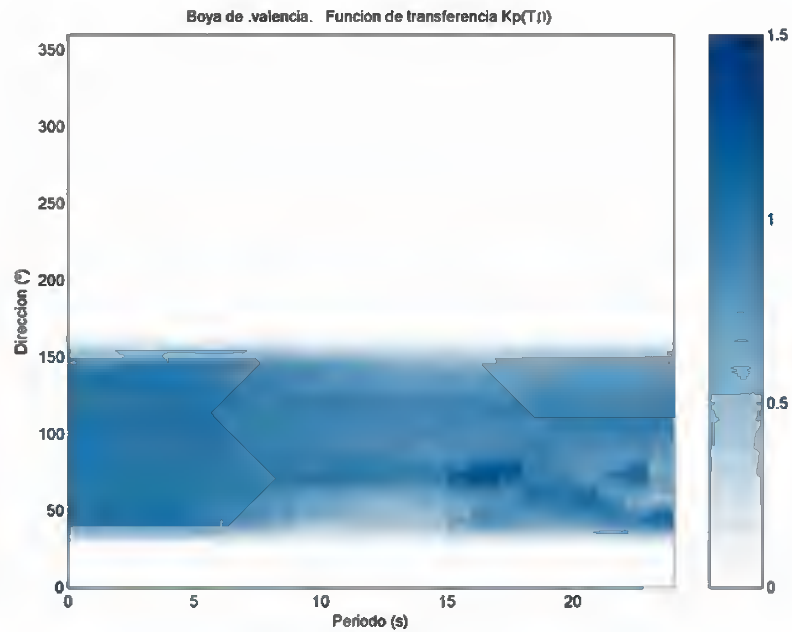


## TORTOSA



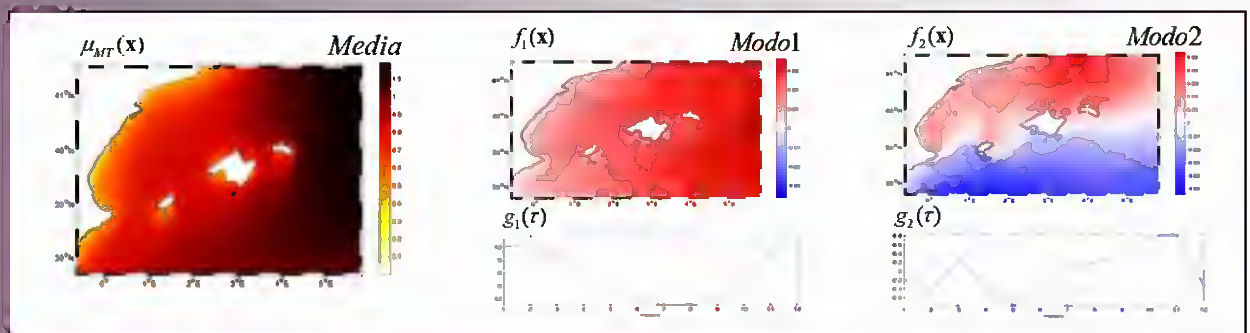


## VALENCIA



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



### ANEXO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN  
ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE  
REANÁLISIS**

**ANTECEDENTES**

---



## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Anejo I-2) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “Materia de Investigación sobre Impactos en la Costa española por Efecto del Cambio Climático”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*





## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:





## **FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.**

### **FASE I A. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

### **FASE I B. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR**

### **FASE I C. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX**

### **FASE I D. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI**

### **ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”**

### **ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

### **ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsible cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

## **FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.**

### **FASE II A. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL**

#### **SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL**

#### **SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA**

### **FASE II B. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





### **FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

**LA FASE III** tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes a la Anejo I-2:

#### **Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

##### **Anejo I-2. Metodología de calibración espacial de bases de datos de modelos de reanálisis**





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE  
BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

**ÍNDICE**

---



## RESUMEN

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVOS DE ESTUDIO
- 1.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y BASES DE DATOS
  - 1.2.1. BASES DE DATOS VISUALES
  - 1.2.2. RED DE BOYAS
  - 1.2.3. DATOS DE TELEDETECCIÓN
  - 1.2.4. DATOS DE REANÁLISIS
- 1.3. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS BASES DE DATOS
- 1.4. NECESIDAD DE LA CALIBRACIÓN DE LAS BASES DE DATOS
- 1.5. OBJETIVOS DEL TRABAJO
- 1.6. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

### CAPÍTULO 2. METODO DE CALIBRACIÓN

- 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL
- 2.2. DOMINIO DEL TIEMPO-PROBABILIDAD
- 2.3. ESCALA TEMPORA
- 2.4. REGÍMENES MEDIOS MENSUALES
  - 2.4.1. REGÍMENES DE  $H_s$
  - 2.4.2. REGÍMENES DE  $T_m$
- 2.5. DESCOMPOSICIÓN EN MODOS
- 2.6. DISCUSIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS DE LAS DISTRIBUCIONES
- 2.7. CALIBRACIÓN BOYA A BOYA
- 2.8. PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN
- 2.9. FUNCIÓN OBJETIVO: ERROR A MINIMIZAR
- 2.10. MÉTODO DE MINIMIZACIÓN DEL ERROR
- 2.11. PARÁMETROS FINALES
- 2.12. ZONIFICACIÓN
- 2.13. RESUMEN DE LA CALIBRACIÓN DE  $H_s$  Y  $T_m$

### CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA





3.1. INTRODUCCIÓN

3.2. RÉGIMEN MEDIO DE  $H_s$

3.3. RÉGIMEN MEDIO-ALTO DE  $H_s$

3.4. PARÁMETROS FINALES DE  $H_s$

3.5. RÉGIMEN MEDIO DE  $T_m$

3.6. PARÁMETROS FINALES DE  $T_m$

CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO

4.1. EJEMPLO DE VALIDACIÓN

4.2. VERIFICACIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO EN UNA BOYA

4.3. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN

4.4. VERIFICACIÓN DEL RÉGIMEN EXTREMAL EN UNA BOYA

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

5.2. ZONA "ANDALUCÍA"

5.2.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.2.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.3. ZONA "BALEARES"

5.3.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.3.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.4. ZONA "CATALUNA"

5.4.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.4.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.5. ZONA "VALENCIA"

5.5.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.5.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.6. ZONA "CANTABRICO"

5.6.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.6.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.7. ZONA "GALICIA"

5.7.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.7.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.8. ZONA "CADIZ"

5.8.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.8.2. CALIBRACIÓN DE TM

5.9. ZONA "CANARIAS"





5.9.1. CALIBRACIÓN DE HS

5.9.2. CALIBRACIÓN DE TM

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6.1. ACERCA DE LA UTILIDAD DE LA CALIBRACION

6.2. ACERCA DEL MÉTODO DE CALIBRACION

6.3. ACERCA DE LOS RESULTADOS

## CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO A. DISTRIBUCIONES

ANEXO B. DESCOMPOSICIÓN EOF



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA

ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

---



## ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

**RESUMEN**

---



## RESUMEN

En este anejo se desarrolla un método de calibración de bases de datos generadas numéricamente con modelos de reanálisis utilizando datos instrumentales. En concreto, se va a calibrar la base de datos generada por el modelo WAM, dentro del proyecto HIPOCAS (SOARES *et al.*, 2002). La base de datos con la que se calibra son los registros de las boyas de oleaje.

El método de calibración se aplica a variables del clima marítimo que caracterizan el estado de mar, como son la altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo medio de pasos ascendentes por cero ( $T_m$ ). No obstante, este método es generalizable a cualquier otra variable geofísica (presiones, viento, corrientes, etc.).

Se realiza la calibración en todo el litoral español, mar Mediterráneo, océano Atlántico e islas. En el mar Mediterráneo la base de datos de HIPOCAS tiene una resolución espacial de  $0.125^\circ$ ; su resolución temporal es de 1 hora y cuenta con una serie continua de 44 años de datos, desde 1958 hasta 2001. En océano Atlántico la base de datos de HIPOCAS tiene una resolución espacial de  $0.25^\circ$ ; su resolución temporal es de 3 horas y cuenta con una serie de 37 años de datos, desde 1958 hasta 1994.

La base de datos instrumentales con la que se va a realizar la calibración en el Mediterráneo cuenta con los registros discontinuos de 38 boyas de oleaje, con resoluciones temporales variables y con series temporales cuyas longitudes totales oscilan entre 20 y 6 años. La distribución espacial de estas boyas es muy heterogénea, repartidas fundamentalmente a lo largo de la costa. Las series temporales de las boyas presentan numerosos huecos, pero a pesar de eso son datos de mucha calidad y fiabilidad.

El método de calibración está basado en la técnica de descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF), que descompone una determinada variable espacio-temporal en modos. La distorsión de estos modos es lo que se utiliza para conseguir calibrar y que la base de datos de HIPOCAS se aproxime a los datos de las boyas. El proceso de optimización se ha realizado utilizando un algoritmo de optimización global de problemas no lineales (DUAN *et al.*, 1994).

Una vez calibrada la base de datos de HIPOCAS, tanto en el Mediterráneo como en el Atlántico, se dispone de una red de boyas virtuales de oleaje con registros continuos de 44 años cada aproximadamente 20 km, proporcionando como información del clima marítimo los regímenes anuales y mensuales de altura de ola significativa y de periodo medio de pasos ascendentes por cero.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN  
ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE  
REANÁLISIS**

**CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes y motivos de estudio**

En la actualidad, España, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En este sentido es de vital importancia el desarrollo de estudios científicos que doten de bases de datos con una resolución espacio-temporal y cubriendo un periodo de tiempo suficiente, que sirvan de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático (OECC, 2002; WOLF, 2003). Así, el Panel Intergubernamental sobre Cambio climático (IPCC, 2001) predice una elevación del nivel medio del mar entre 10 y 80 cm para el año 2100.

Así, la creación de bases de datos de calidad, de alta resolución a lo largo de un periodo largo de tiempo, que contengan los parámetros del clima marítimo en todas las costas españolas (incluyendo las islas) es un tema que suscita gran interés y no menos esfuerzos en nuestra comunidad científica.

La generación de bases de datos de modelos de reanálisis tiene como objetivo determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas y con ellos predecir los previsibles cambios en la citada dinámica debidos al cambio climático.

### **1.2. Recopilación de información y bases de datos**

Previamente a la creación de una base de datos, con las características anteriormente expuestas, se hace un análisis exhaustivo de las diferentes bases de datos que existen en la actualidad.

En general, existen dos tipos de fuentes de datos a partir de los cuales se puede obtener la información requerida: datos provenientes de observaciones o datos generados numéricamente. Desafortunadamente, los primeros presentan una gran cantidad de problemas. En primer lugar, las series temporales no son, en general, suficientemente largas como para obtener la información requerida. Asimismo, dichas bases de datos no tienen una suficiente homogeneidad espacial o no han sido sometidas al control de calidad necesario para garantizar que los resultados obtenidos a partir de los mismos puedan ser fiables.







La generación de datos a partir de modelos ya sea atmosféricos, de oleaje, corrientes o transporte, permite obtener largas series temporales en dominios extensos y con una distribución espacial suficiente que permite realizar un análisis adecuado.

A continuación, se pasa revista a las diferentes bases de datos de oleaje disponibles en el litoral español.

### **1.2.1. Bases de datos visuales**

El Ente Público Puertos del Estado (EPPE) tiene una base de datos visuales, proporcionados por el National Climatic Data Center, USA (NCDC). Estos datos fueron tomados por observadores entrenados desde barcos en ruta. Se dispone de una malla espacial de 1° de lado y una serie de datos de larga duración (1950-1994).

### **1.2.2. Red de boyas**

Se ha recopilado la información instrumental suministrada por EPPE que incluye su red de boyas de aguas profundas y la red costera. La boya que cuenta con la serie temporal más larga cuenta con aproximadamente 20 años de datos. Dichas redes cubren la península y parte de los archipiélagos (ver figura 1.1).

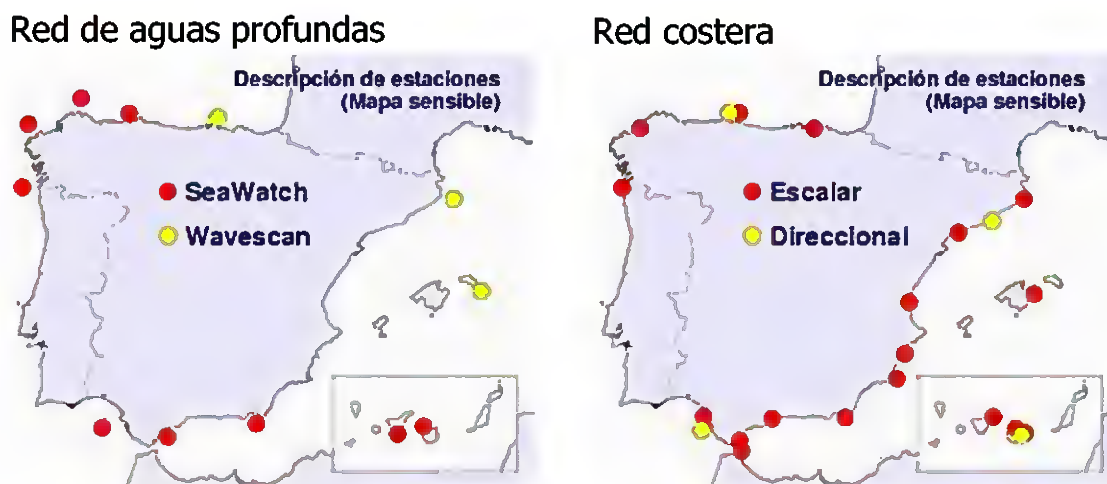


Figura 1.1. Red de boyas del Ente Público Puertos del Estado

La red de aguas profundas está formada por 9 boyas Seawatch y 3 Wavescan. Los instrumentos están ubicados en puntos con profundidades entre 200 y 800 metros.



La red costera de Puertos del Estado proporciona datos de oleaje en puntos de aguas poco profundas. Su objetivo es complementar las medidas de la red exterior en lugares de especial interés para las actividades portuarias o la validación de modelos de oleaje. Consta de 18 boyas escalares Waverider (red REMRO), y de 5 boyas direccionales.

La red de boyas de la Generalitat de Catalunya dispone de 5 boyas Waverider, 3 escalares (Rosas, Tordera y Llobregat) y 2 direccionales (Tortosa y Trabucador). En la figura 1.2 se ve la situación de todas ellas.

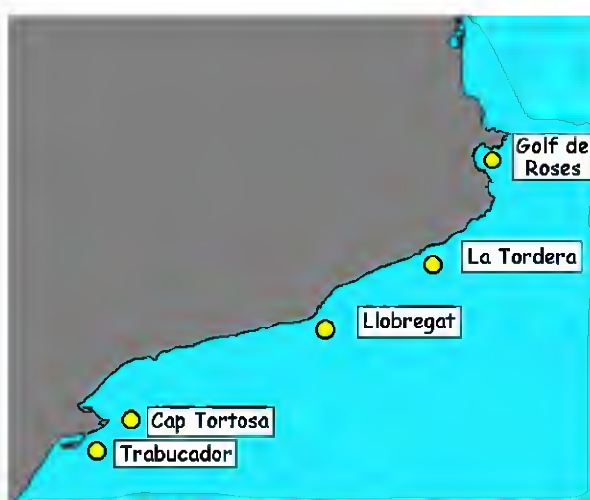


Figura 1.2. Red de boyas de la Generalitat de Catalunya

### **1.2.3. Datos de teledetección**

Los datos provenientes de teledetección, como el proyecto ENVIWAVE, está basado en la determinación de parámetros del oleaje a partir de los datos suministrados por el satélite ENVISAT (Agencia Espacial Europea). Este proyecto comenzó en el 2002 y tiene una duración de tres años. Otro estudio sobre estimación de altura de ola significativa a partir de datos de satélites (ALVES & YOUNG, 2003) tiene una serie de 10 años de duración (1986-1995), con una resolución espacial de 2°.

#### **1.2.4. Datos de reanálisis**

Asimismo, se ha recopilado toda la información relativa a los proyectos WASA, WANA, HIPOCAS y ERA-40 que por su relevancia se describen con mayor detalle a continuación.

El conjunto de datos WASA (WASA, 1998) procede del proyecto financiado por la UE que lleva el mismo nombre. Dicha base de datos está formada por el retroanálisis de oleaje de 40 años (1955-1994). Los datos se obtuvieron aplicando el modelo de generación de oleaje WAM en el Atlántico Norte.

El proyecto WANA, puesto en marcha por el Programa Marítimo de Puertos del Estado, utiliza el modelo WAN de generación del oleaje en una red próxima a las costas españolas con datos desde 1995 cada 3-5 horas y con una resolución espacial de 0.125°-0.25°.

El proyecto HIPOCAS (SOARES *et al.*, 2002) ha generado una base de datos homogénea de 44 años (1958-2001).

La resolución horizontal oscila entre 0.25° y 0.125° y las resoluciones temporales varían entre 1 y 3 horas. Estos datos de oleaje se obtienen a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos obtenidas del modelo REMO que son utilizados como forzamiento para el modelo numérico WAM de oleaje (EPPE, 2003). En la figura 1.3 se representa la malla utilizada en el mar Mediterráneo con resolución espacial de 0.125° (resolución temporal de 1 hora).

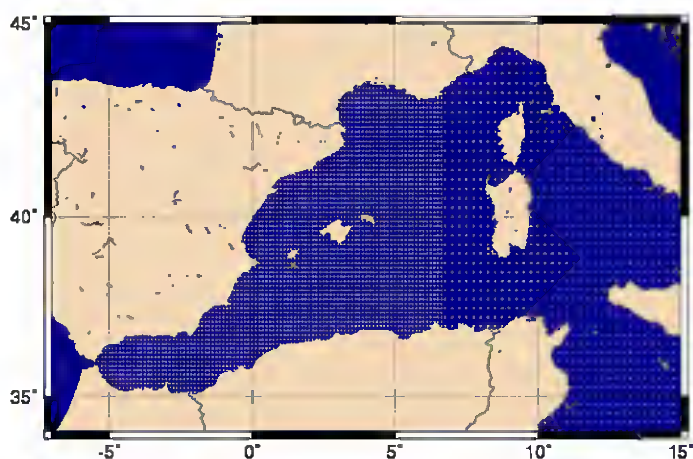


Figura 1.3. Malla correspondiente al modelo WAM de oleaje en el Mediterráneo

Además, se dispone de la base de datos del retroanálisis de oleaje ERA-40 de 46 años (1957-2002) cada 6 horas. En la figura 1.4 se muestra un detalle de la malla de 1.5° de resolución espacial de la zona del atlántico.

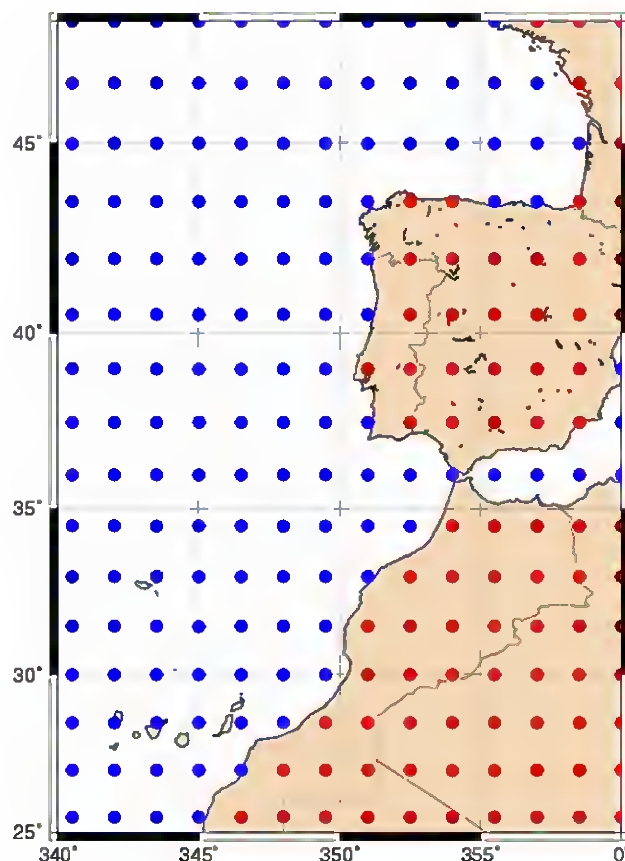


Figura 1.4. Malla del atlántico del retroanálisis de oleaje ERA-40

### 1.3. Evaluación y selección de las bases de datos

En la sección anterior, ya se ha descrito la información relativa a las bases de datos, tras la evaluación realizada se llegan a las siguientes conclusiones:

Los datos visuales, a pesar de su larga duración, tienen importantes carencias: están restringidos a zonas de tránsito de barcos (rutas predeterminadas); están poco repartidos en el tiempo y no tienen datos extremales, 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... Por todo esto, los datos visuales no se utilizan en este estudio.

Las series instrumentales, especialmente las correspondientes al sistema de boyas de EPPE son limitadas en cuanto a su distribución espacial y muy especialmente en cuanto a la



longitud temporal de sus registros. Todos estos datos no pueden ser utilizados de forma directa para realizar una buena base de datos, pero son muy fiables.

Los proyectos basados en teledetección no tienen series de datos suficientemente largas y no siempre suficiente resolución espacial, pero en el futuro se prevé que sea una excelente base de datos.

Aunque los datos del WASA son el primer intento por tener una base de datos con un retroanálisis del oleaje sobre una malla relativamente densa, estos datos han sido ampliamente superados por iniciativas posteriores tales como las de HIPOCAS.

Los datos disponibles del proyecto WANA se limitan a la costa española y las series de datos no tienen una longitud suficiente.

HIPOCAS incluye la base de datos con un retroanálisis de 44 años y con mayor resolución temporal y espacial.

ERA-40 la base de datos con un retroanálisis más largo, 46 años, pero su resolución espacial y temporal es superado por la base de datos de HIPOCAS.

#### **1.4. Necesidad de la calibración de las bases de datos**

Una vez revisadas las distintas bases de datos se ha llegado a la conclusión de que la base de datos del proyecto HIPOCAS es la más adecuada. Esto es debido a que incluye una serie temporal de 44 años de datos suficientemente fiables con una resolución temporal (1-3 horas) y espacial ( $0.125^{\circ}$ - $0.25^{\circ}$ ) ideal para alcanzar los objetivos propuestos.

Sin embargo, 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 estándar de las series de datos generadas menores que las dadas por teledetección (EPPE, 2003).

En la figura 1.5 se representa para la posición de la boya de Alicante las series temporales de altura de ola significativa ( $H_s$ ) y periodo medio ( $T_m$ ) comparando la base de datos de la boya de Alicante con la base de datos de HIPOCAS, propagado hasta la posición de la boya. Se puede observar que los picos de una serie (los temporales) coinciden con los de la otra, la base de datos de HIPOCAS está bien en fase. Pero en magnitud no coinciden las





series. Por lo tanto las series temporales de las bases de datos de HIPOCAS no hay que desfasarlas en el tiempo, sólo hay que corregir sus magnitudes.

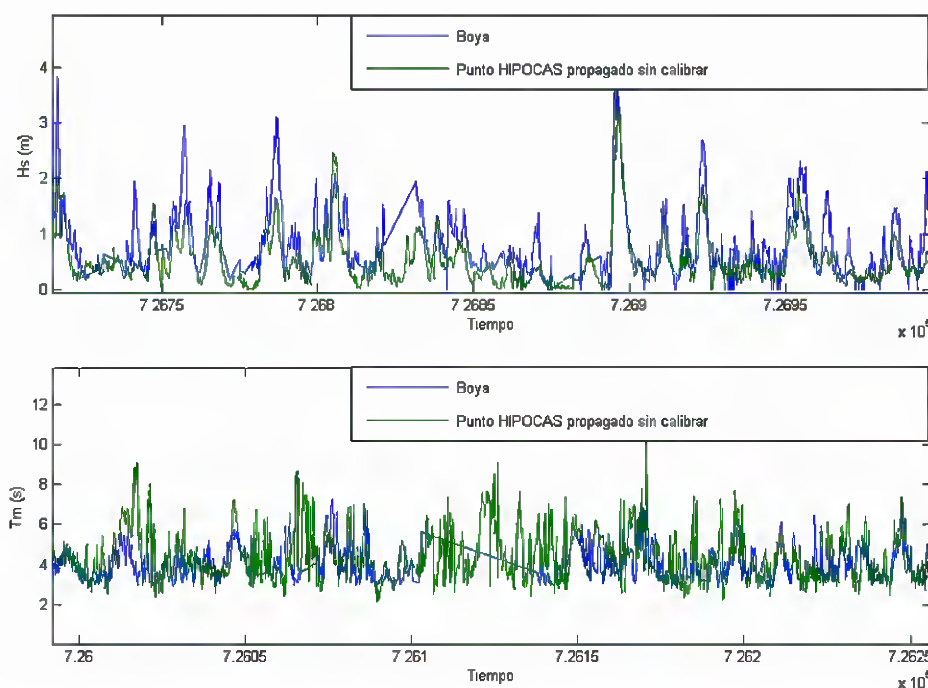


Figura 1.5. Comparación entre HIPOCAS y la boya de Alicante para  $H_s$  y  $T_m$

En la figura 1.6 se comparan percentil a percentil de probabilidad acumulada, las series de  $H_s$  de la boya de Alicante corregida (propagada hasta profundidades indefinidas) y la  $H_s$  de HIPOCAS para la posición de la boya de Alicante. Se comprueba que tienen regímenes distintos (si fuesen iguales los puntos se situarían sobre la bisectriz).





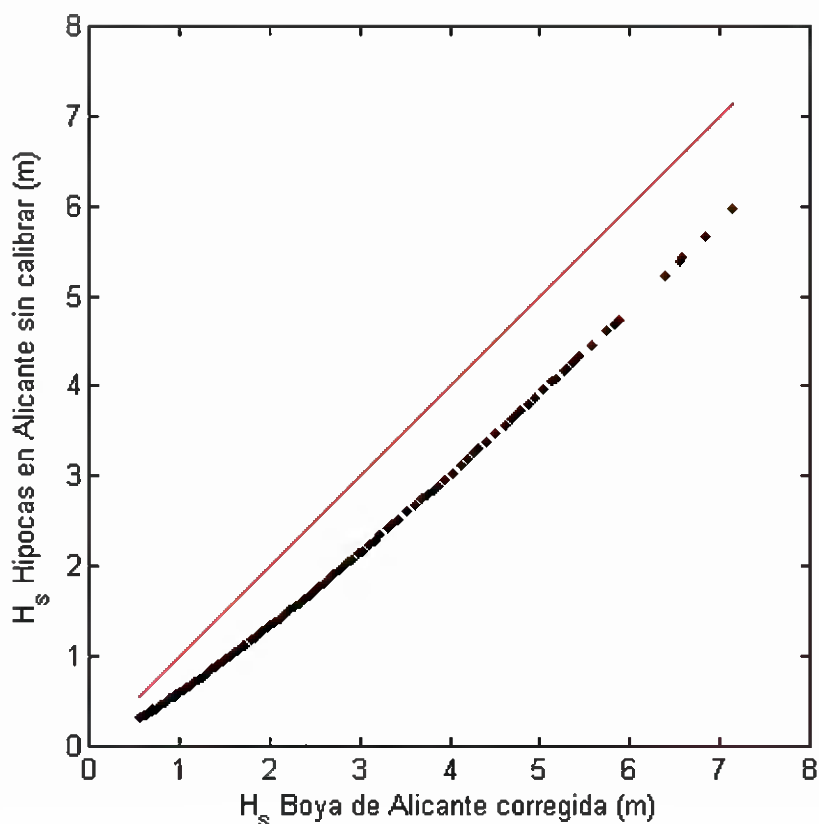


Figura 1.6. Comparación probabilística de  $H_s$  de la boya de Alicante con  $H_s$  de HIPOCAS

Se pone así de manifiesto la necesidad de realizar una calibración de los datos del modelo con los datos instrumentales con el fin de mejorar aún más la calidad de los datos de partida.

Los datos provenientes de los modelos pueden no tener tanta fiabilidad como los datos medidos directamente. Por lo que en los puntos donde sea posible se comparan la base de datos HIPOCAS con la base de datos instrumentales, corrigiendo los datos modelados para que se aproximen a los datos medidos. Así, a partir de los puntos donde se pueden comparar las distintas bases de datos, es decir, las posiciones de las boyas; se calibra todo la base de datos de HIPOCAS. Se generará una base de datos homogénea y fiable, con largas series temporales y con excelentes resoluciones espaciales y temporales.





## 1.5. Objetivos del trabajo

El objetivo fundamental de este trabajo es calibrar la base de datos de HIPOCAS con los datos registrados por la red de boyas de oleaje. El método de calibración se particulariza para los parámetros  $H_s$  y  $T_m$  a lo largo de las costas españolas.

Por otro lado, se va a obtener series de datos continuas de 44 años (como mínimo cada 3 horas) de una resolución espacial próxima a los 20 km y con una excelente calidad (análoga a la de las redes de medida). Así como los regímenes medios anuales y también los mensuales en cada punto.

## 1.6. Estructura del trabajo

Este anejo se ha estructurado en seis capítulos y dos anexos. El primer capítulo, en el que se incluye este apartado, se introduce en el tema de la calibración. Se explican los motivos de este estudio, así como también se describen las bases de datos existentes y se evalúan, para justificar la necesidad de su calibración, planteando finalmente los objetivos de este trabajo.

En el capítulo dos se detalla exhaustivamente el método de calibración, describiendo y comentando todos los aspectos e hipótesis realizadas.

En el capítulo tres se aplica el método de calibración a una zona concreta del mar Mediterráneo.

En el capítulo cuatro se explica la validación realizada del modelo, concretándola con un ejemplo. También se verifican los resultados en una boya de oleaje de profundidades indefinidas.

En el capítulo cinco se muestran los resultados de las calibraciones realizadas, tanto para el parámetro  $H_s$  como para  $T_m$ , para todo el litoral español.

Finalmente en el capítulo seis se comentan las conclusiones a las que se han llegado.

En el anexo A se explican las distribuciones estudiadas y en el anexo B se detalla el método de descomposición en EOF.





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN  
ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE  
REANÁLISIS**

**CAPÍTULO 2. MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

---



## 2. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

### 2.1. Descripción general

Los modelos numéricos de retroanálisis y de predicción de variables oceanográficas se muestran hoy en día como una herramienta imprescindible. En este trabajo se ha utilizado una base de datos de clima marítimo (simulación horaria en el período 1958 a 2001 del proyecto HIPOCAS). Dicha base de datos se calibra espacialmente con registros instrumentales a partir de una técnica de descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF). Se calibra todo el dominio del tiempo y del espacio de la base de datos de HIPOCAS a partir de unos valores discretos y muy reducidos en cantidad, pero de gran valor y fiabilidad: los datos suministrados por las boyas de oleaje.

El método de calibración empleado agrega los datos de las bases de datos antes de compararlos; definidas unas nuevas escalas espaciales y temporales, se determinan una serie de parámetros que representen cada variable a calibrar ( $H_s$  y  $T_m$ ) tanto para las series de HIPOCAS como de las boyas. Estos parámetros serán los que definen las distribuciones de los regímenes medios mensuales. Las series de datos de las boyas deben estar definidos en los mismos términos que las de HIPOCAS, para que se puedan comparar ambos conjuntos de parámetros de las distribuciones, definidos a partir de estas series.

Una vez determinados los parámetros a calibrar de las distribuciones de HIPOCAS, se hace la descomposición en EOF y se determina el número de modos que se va a utilizar para reproducir estos mismos en función de unos parámetros de la calibración. La determinación de los parámetros de la calibración se realiza minimizando el error cuadrático de la diferencia entre el parámetro a calibrar determinado a partir de las distribuciones de los regímenes medios de la base de datos de HIPOCAS y el parámetro a calibrar determinado a partir de las distribuciones de los regímenes medios de la base de datos de las boyas, para cada posición y para cada unidad de tiempo.

A continuación se van a ir comentando y definiendo las distintas variables, así como las hipótesis realizadas para definir el método de calibración tanto de  $H_s$  como de  $T_m$ .

### 2.2. Dominio del tiempo-probabilidad

Debido a la complejidad del problema, es necesario fijar a priori la escala temporal de calibración del problema. Así, la calibración se puede realizar en el dominio del tiempo o desde un punto de vista probabilista:



- Dominio del tiempo: Es necesario calibrar las series temporales instantáneas (p.e. altura de ola significativa horaria) o series temporales agregadas (p.e. altura de ola significativa media diaria-mensual-estacional).
- Aproximación probabilista: Se calibra la base de datos agregada en términos de la evolución temporal de los regímenes de oleaje.

Para los fines de este trabajo se ha considerado más adecuada la aproximación probabilista. De esta manera, en lugar de estudiar las series temporales instantáneas, se va a trabajar con el régimen medio de oleaje (ver figura 2.1). Así, se reduce el número de variables a analizar, sin perder la información del régimen medio del oleaje. Aunque se elimine la información instantánea, lo que interesa es calibrar el clima marítimo del litoral, y no tanto los sucesos instantáneos.

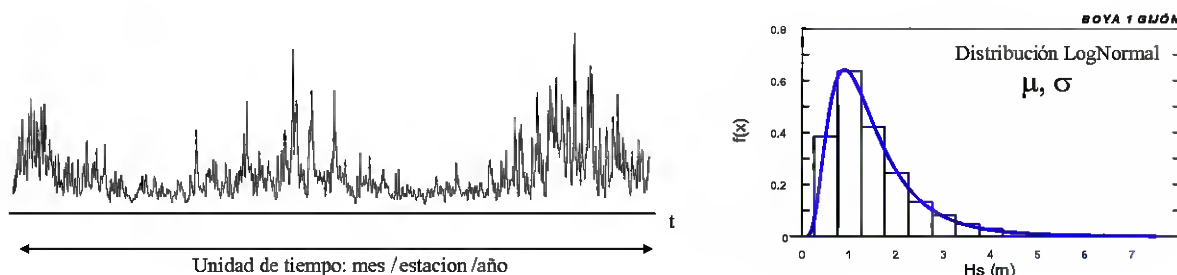


Figura 2.1. Ejemplo de agregación de serie temporal de altura de ola significativa

### 2.3. Escala temporal

Una vez elegida la aproximación probabilística, hay que definir cual es el intervalo de tiempo en el que se agregan los datos para ajustarlos a un determinado régimen.

Se pueden plantear dos tipos de discretizaciones del tiempo:

- Agregar los datos de cada unidad de tiempo a lo largo de los 44 años. Por ejemplo: para la unidad de tiempo el año, 44 regímenes; para la unidad de tiempo la estación, 44x4 regímenes; para la unidad de tiempo el mes, 44x12 regímenes (parte superior de la figura 2.2).
- Para cada unidad de tiempo determinada agregar los datos de todos y cada uno de los años de la serie. Por ejemplo: para la unidad de tiempo el año, 1 régimen; para la unidad de tiempo la estación, 4 regímenes; para la unidad de tiempo el mes, 12 regímenes (parte inferior de la figura 2.2).

El primer tipo de discretización es una evolución temporal, a lo largo de los 44 años, de regímenes que van fluctuando según las estaciones, ciclo invierno-verano. Para recoger esa fluctuación y agregar los datos de manera más eficaz, se elige el segundo tipo de discretización, de manera que se juntan los datos más homogéneamente; datos de enero con datos de enero, febrero con febrero... a lo largo de los 44 años.

Otra ventaja de elegir el segundo tipo de discretización temporal está vinculada a la necesidad de calibrar con boyas; con esta discretización, para todos los regímenes a calibrar, siempre se tienen regímenes de las boyas con los que calibrar. En cambio para el primer tipo, de muchos regímenes no hay datos de las boyas (las series temporales de las boyas son más cortas).

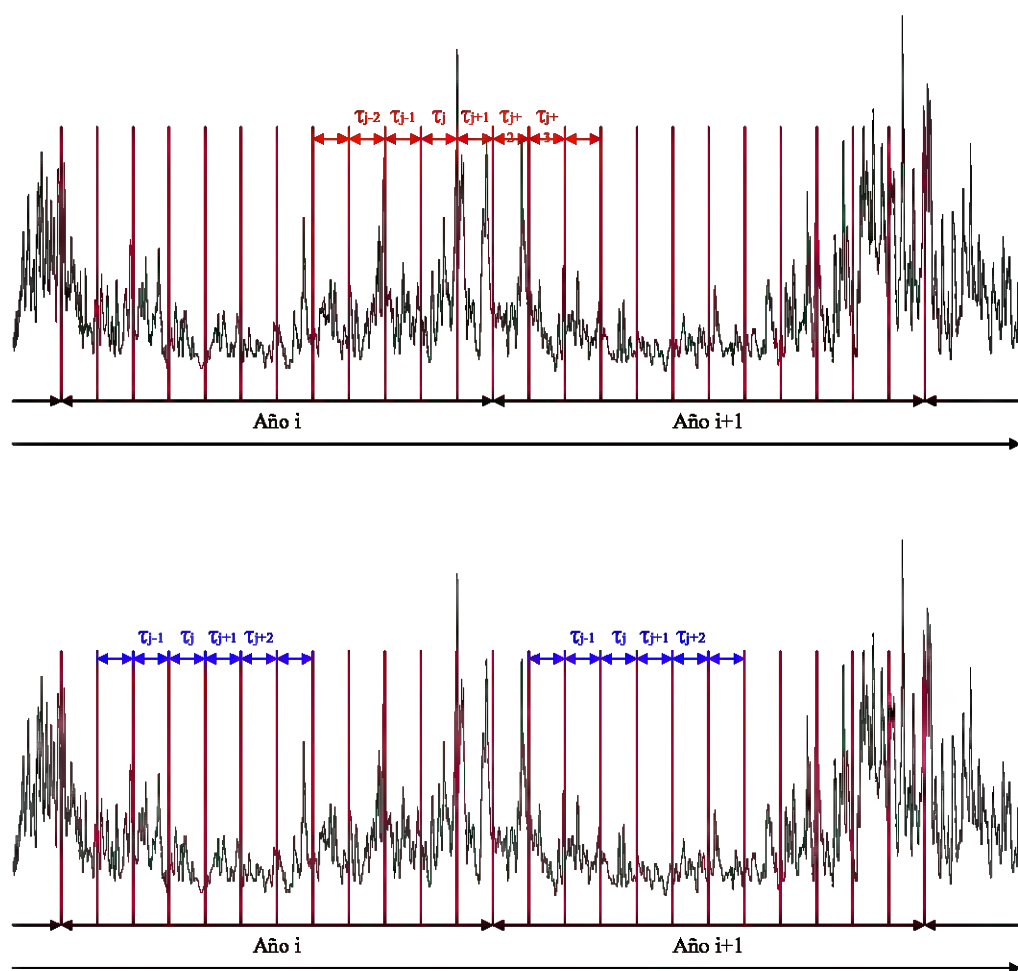


Figura 2.2. Discretización del tiempo ( $t$ ) con unidad del tiempo el mes ( $\tau$ ), para los dos tipos de discretizaciones.



Finalmente se ha seleccionado una discretización mensual a lo largo del año de forma que se agregan los datos de todos los enero para el primer régimen, de todos los febrero para el segundo, y así sucesivamente hasta tener los 12 regímenes en los que se discretiza el tiempo. Para el ejemplo de la figura 2.2, en la parte inferior,  $j$  oscilaría entre 1 y 12,

$$\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}.$$

## 2.4. Regímenes medios mensuales

Para cada mes, los datos agregados se ajustan a un determinado modelo matemático-estadístico (régimen medio mensual); pero también se puede ajustar, dentro de cada mes y para distintos intervalos de probabilidad, a, por ejemplo, modelos compuestos formados por dos ramas.

En la literatura, tres de las distribuciones más utilizadas para ajustar a los regímenes de  $H_s$  son la Lognormal, Gumbel de máximos y Weibull de máximos. Para  $T_m$  la distribución más usual es la Lognormal (VON STORCH & ZWIERS, 2001). El ajuste a estas distribuciones se realiza mediante la determinación de unos parámetros de ajuste; para Lognormal son 2,  $\mu^*$  y  $\sigma^*$ ; para Gumbel de máximos son 2,  $\lambda$  y  $\delta$ ; para Weibull de máximos son 3,  $\lambda$ ,  $\delta$  y  $\beta$ . Las distribuciones Gumbel de máximos y Weibull de máximos están algo más indicadas para la rama alta del régimen medio, pues separan más los percentiles más altos. Una descripción de estas distribuciones y de sus papeles probabilísticos aparece en el anexo A, así como la relación entre  $\mu^*$  y  $\sigma^*$  y  $\mu$  y  $\sigma$ , para la distribución Lognormal.

Es importante señalar que se deben definir unos regímenes que se ajusten a todos los puntos de la malla de estudio y para todas las unidades de tiempo. Para cada variable ( $H_s$  o  $T_m$ ) se tendrá una definición de régimen homogéneo para poder hacer una calibración correcta, es decir para poder hacer comparaciones de parámetros definidos en los mismos términos.

### 2.4.1. Regímenes de $H_s$

Se han analizado regímenes de  $H_s$  de todo el litoral español; que puntuados en papel probabilístico Lognormal presentan dos zonas diferenciadas, que están separadas por un cambio en la pendiente de las series de  $H_s$  localizado aproximadamente en la probabilidad acumulada del 99.5%. La primera zona se puede ajustar a una línea recta hasta una probabilidad del 99.5%, esta característica se repite en los regímenes de todo el litoral español. La segunda zona, desde 99.5% hasta el 100%, se ajusta peor a una línea recta en





este papel, tiene muchos quiebros, en parte debidos a una menor cantidad de puntos. En la figura 2.3 se muestra la serie de  $H_s$  de HIPOCAS en papel probabilístico Lognormal para  $\tau_{12}$  (diciembre), en la posición de Cabo de Palos, donde se pueden observar las dos zonas comentadas.

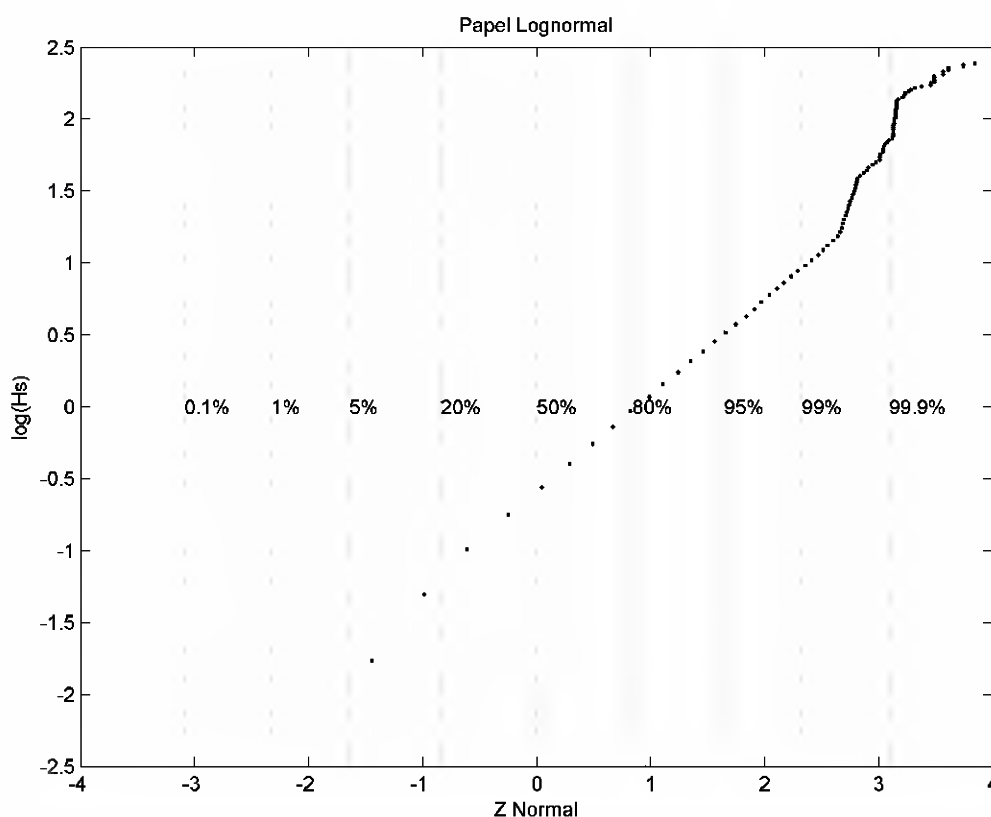


Figura 2.3. Serie de  $H_s$  de HIPOCAS de la posición de Cabo de Palos en papel probabilístico Lognormal para  $\tau_{12}$ .

Los regímenes de  $H_s$  puntuados en el papel probabilístico Gumbel de máximos presentan también dos zonas. La primera zona llega hasta una probabilidad del 99.5%, en esta zona se ajusta mal una línea recta. La segunda zona, desde 99.5% hasta el 100%, tiene muchos quiebros, a pesar de ello se ajusta mejor a una línea recta que con el papel lognormal. En la figura 2.4 se muestra la serie de  $H_s$  de HIPOCAS en papel probabilístico Gumbel de máximos para  $\tau_{12}$  (diciembre), en la posición de Cabo de Palos.



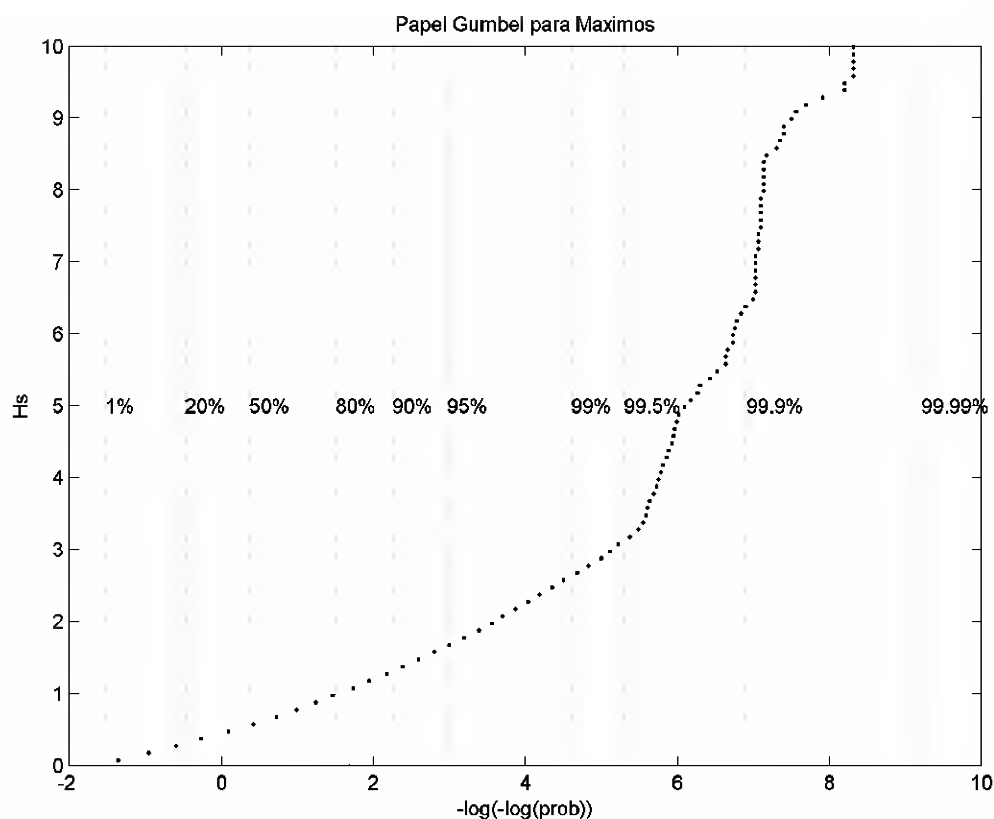


Figura 2.4. Serie de  $H_s$  de HIPOCAS de la posición de Cabo de Palos en papel probabilístico

Gumbel de máximos para  $\tau_{12}$ .

Los regímenes de  $H_s$  punteados en el papel probabilístico Weibull de máximos presentan también las mismas dos zonas que los papeles Lognormal y Gumbel de máximos. La primera zona se ajusta mal una línea recta. La segunda zona, tiene también muchos quiebros, los ajustes a una línea recta son similares a los de la Gumbel de maximos. En la figura 2.5 se muestra la serie de  $H_s$  de HIPOCAS en papel probabilístico Weibull de máximos para  $\tau_{12}$  (diciembre), en la posición de Cabo de Palos.



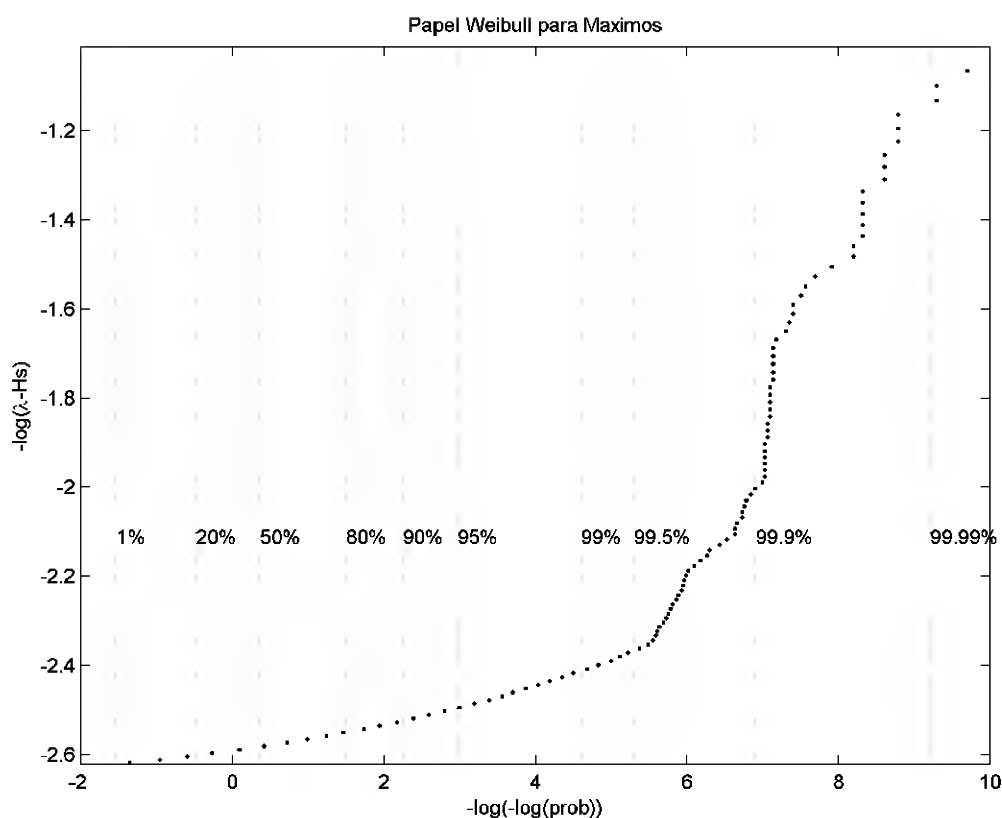


Figura 2.5. Serie de  $H_s$  de HIPOCAS, de la posición de Cabo de Palos, en papel probabilístico Weibull de máximos para  $\tau_{12}$ .

Finalmente se ha elegido, para  $H_s$ , separar el régimen en dos tramos, de manera que en cada intervalo de probabilidad se hace un ajuste distinto. El primer ajuste se hace en papel Lognormal entre el 20% y 99.5% de probabilidad acumulada. Se ha quitado el intervalo entre 0% y 20% porque en algunas ocasiones presentan irregularidades que empeoran el ajuste de la zona entre el 20% y 99.5% que se ajusta muy bien a una línea recta. De todas formas la eliminación de estos puntos no es relevante, pues la probabilidad acumulada del 20% nunca se produce para  $H_s$  mayores de 0.5 metros. En la comunidad científica se suele considerar que  $H_s$  menores de 0.5 metros son calmas. Al régimen determinado por este ajuste se llamará de ahora en adelante régimen medio.

El segundo ajuste se hace en papel Gumbel de máximos entre el 99.5% y 100% de probabilidad acumulada. Los ajustes en este intervalo hechos con papel Gumbel de







máximos y Weibull de máximos son similares, aunque mejores que los realizados con papel Lognormal. Se ha elegido el papel Gumbel de máximos por ser biparamétrico, mientras que Weibull de máximos es triparamétrico. Este régimen en papel Gumbel de máximos entre el 99.5% y 100% se llamará régimen medio-alto.

En la figura 2.6 se muestra la serie de  $H_s$  de HIPOCAS para  $\tau_{12}$  (diciembre), en la posición de Cabo de Palos, ajustando el régimen medio y el régimen medio-alto.

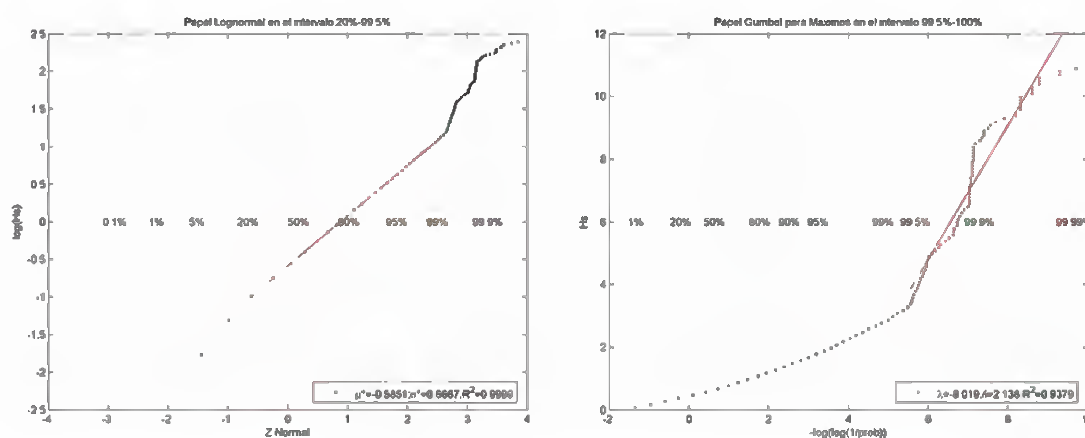


Figura 2.6. Régimen medio (derecha) y el régimen medio-alto (izquierda) de  $H_s$  para  $\tau_{12}$ , en la posición de Cabo de Palos.

Por lo tanto se determinarán los cuatro parámetros que describen el régimen medio ( $\mu^*$  y  $\sigma^*$ ) y el régimen medio-alto ( $\lambda$  y  $\delta$ ) en cada punto HIPOCAS. En la figura 2.7 se muestra la distribución espacial, en el mar Mediterráneo, del parámetro  $\mu$  del régimen medio de la distribución Lognormal, para las series de  $H_s$  de HIPOCAS del mes de enero. Se aprecia en la figura como el valor del parámetro disminuye en las cercanías de la costa.



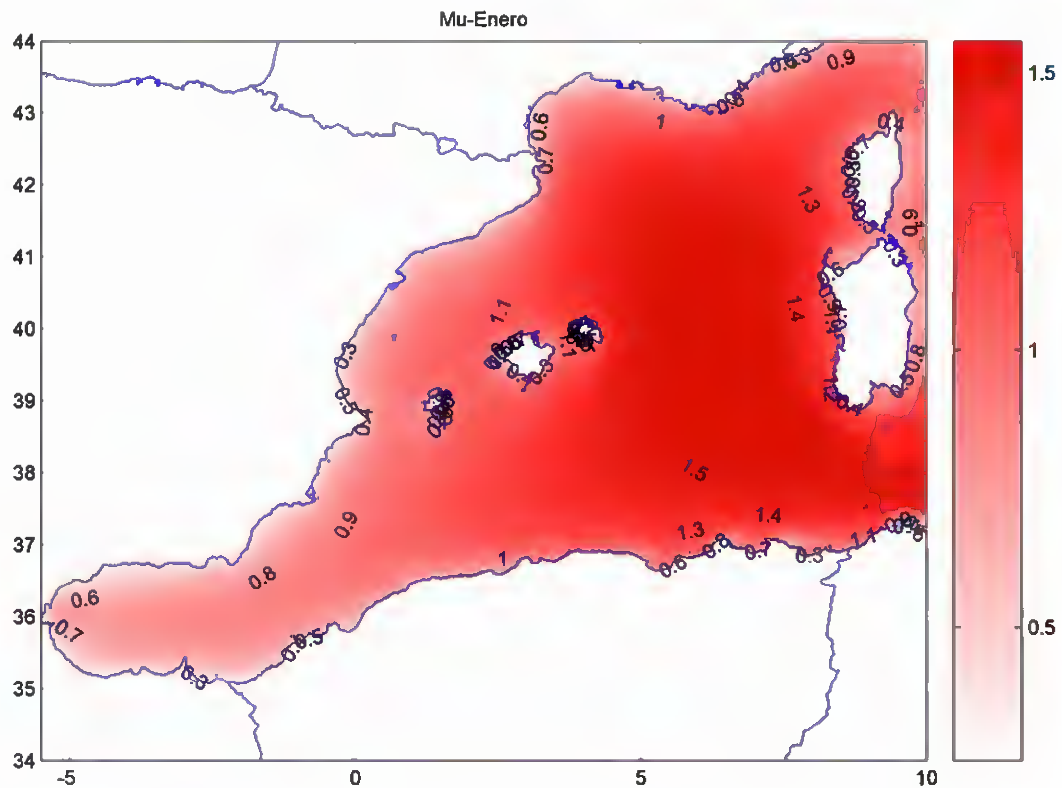


FIGURA 2.7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, DEL PARÁMETRO  $\mu$  DE LA DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL, PARA LAS SERIES DE  $H_s$  DE HIPOCAS PARA  $\tau_1$ .

En la figura 2.8 se muestra la distribución espacial, en el mar Mediterráneo, del parámetro  $\delta$  del régimen medio-alto de la distribución Gumbel de máximos, para las series de  $H_s$  de HIPOCAS del mes de febrero. La distribución espacial de este parámetro ( $\delta$ ) es más irregular que, por ejemplo, el parámetro  $\mu$  de la Lognormal. Así, se determinan los parámetros de los dos regímenes, para todos los puntos de HIPOCAS y para las 12 unidades de tiempo ( $\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}$ ).



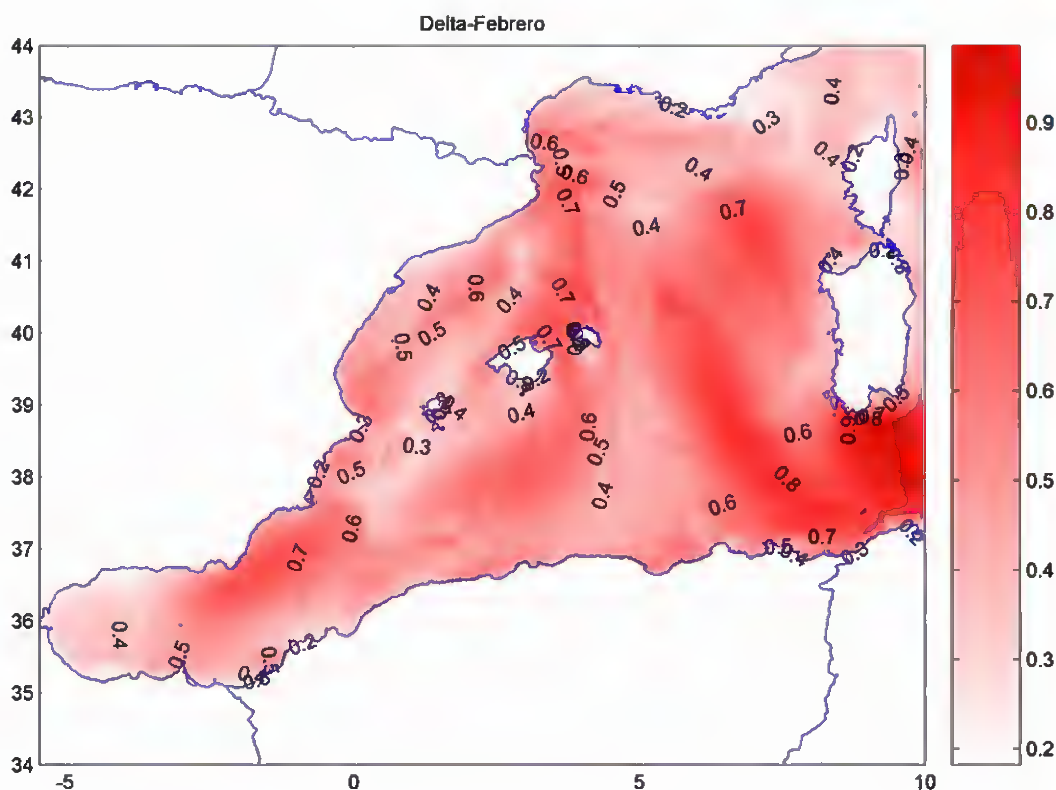


FIGURA 2.8. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, DEL PARÁMETRO  $\delta$  DE LA DISTRIBUCIÓN GUMBEL DE MÁXIMOS, PARA LAS SERIES DE  $H_s$  DE HIPOCAS PARA  $\tau_2$ .

También se determinan los cuatro parámetros que describen el régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ ) y el régimen medio-alto ( $\lambda$  y  $\delta$ ) de las series de datos de las boyas. En la figura 2.9 se representa la evolución temporal de estos cuatro parámetros para la boya de Cabo de Palos. Se observa una oscilación anual en los parámetros del régimen medio, que evidencian las diferencias del clima marítimo entre el invierno y el verano;  $\mu$  y  $\sigma$  aumentan en invierno y disminuyen en verano. Las variaciones del clima marítimo también se notan en los parámetros del régimen medio-alto, en invierno  $\lambda$  disminuye y  $\delta$  aumenta. Estas pautas son generales para todas las zonas litorales españolas.



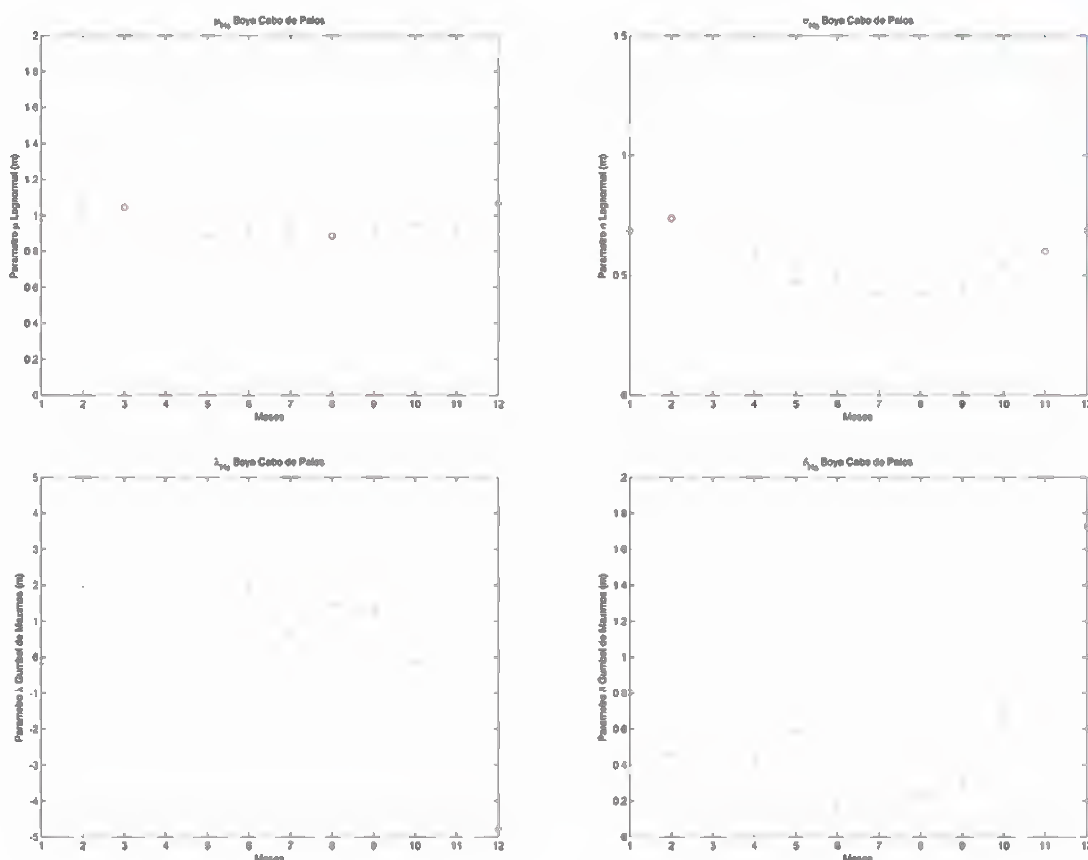


FIGURA 2.9. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$  Y  $\delta$  DE LAS SERIES DE  $H_s$  de la boya de Cabo de Palos.

### 2.4.2. Regímenes de $T_m$

Se han analizado regímenes de  $T_m$  de todo el litoral español, se han punteado en papel probabilístico Lognormal y se ha comprobado que ajustan muy bien a una línea recta. En algunas ocasiones, para probabilidades altas o bajas, existen quiebras que estropean el ajuste de la zona media. Por ese motivo se ha definido el régimen ajustando una línea recta, en papel probabilístico Lognormal, entre el 1% y 99% de probabilidad acumulada. En la figura 2.10 se muestra la serie de  $T_m$  de HIPOCAS en papel probabilístico Lognormal para  $\tau_{12}$  (diciembre), en la posición de Cabo de Palos.

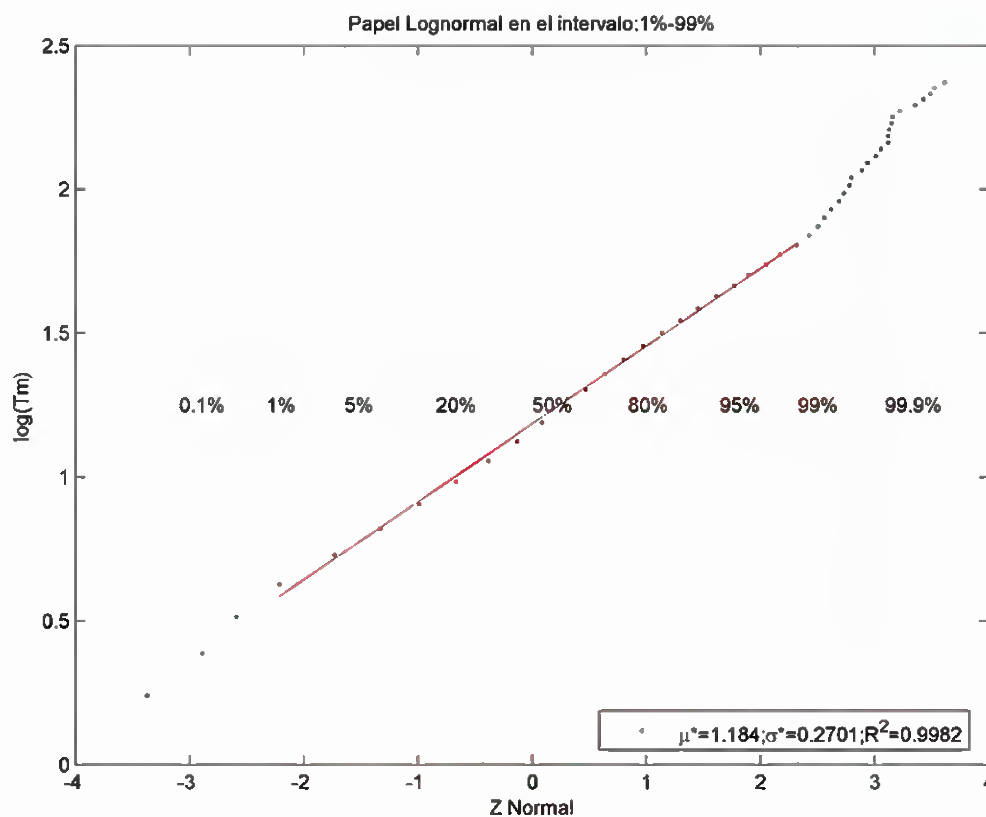


Figura 2.10. Régimen medio de  $T_m$  para  $\tau_{12}$ , en la posición de Cabo de Palos.

Al igual que con las series de  $H_s$ , se determinarán los dos parámetros que describen el régimen medio ( $\mu^*$  y  $\sigma^*$ ) para las series de  $T_m$  de HIPOCAS en cada posición. En la figura 2.11 se dibuja la distribución espacial, en el mar Mediterráneo, del parámetro  $\mu$  del régimen medio de la distribución Lognormal, para las series de  $T_m$  de HIPOCAS del mes de noviembre.

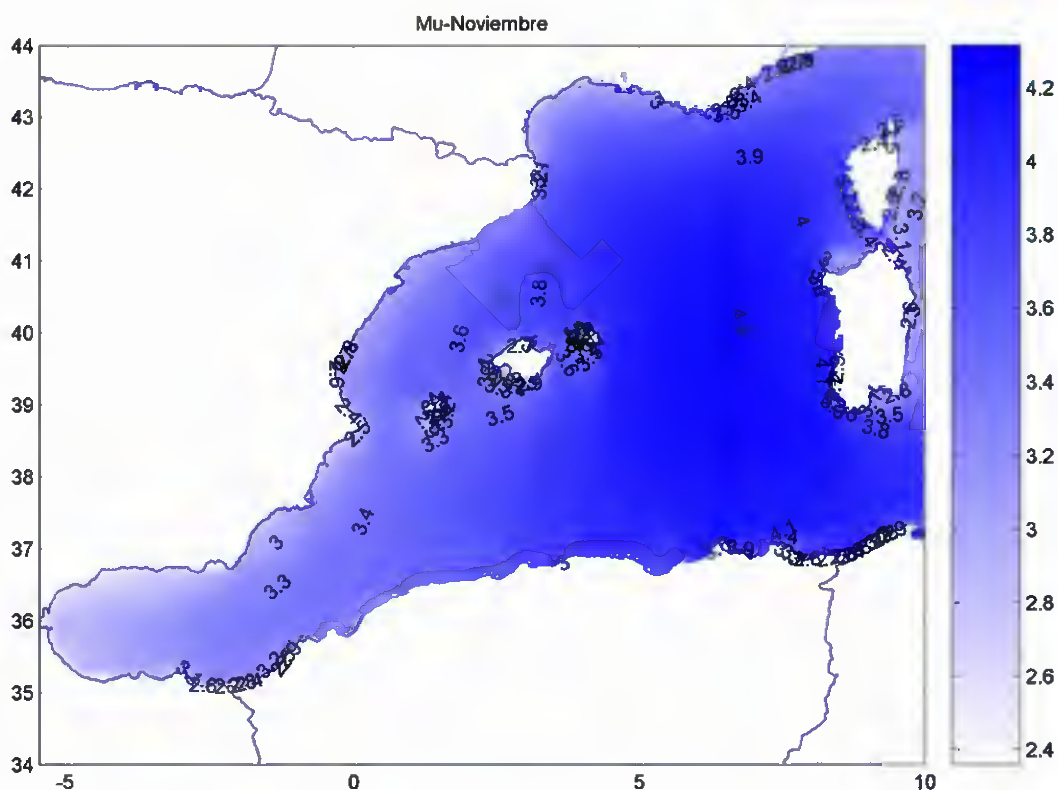


FIGURA 2.11. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, DEL PARÁMETRO  $\mu$  de la distribución Lognormal, para las series de  $T_m$  de HIPOCAS para  $\tau_{11}$

En la figura 2.12 se muestra la distribución espacial, en el mar Mediterráneo, del parámetro  $\sigma$  del régimen medio de la distribución Lognormal, para las series de  $T_m$  de HIPOCAS del mes de noviembre. Se aprecia, tanto en la figura 2.11 como en la 2.12, como el valor de los parámetros disminuye en las cercanías de la costa. Así, se determinan los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal, para todos los puntos de HIPOCAS y para las 12 unidades de tiempo ( $\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}$ ).



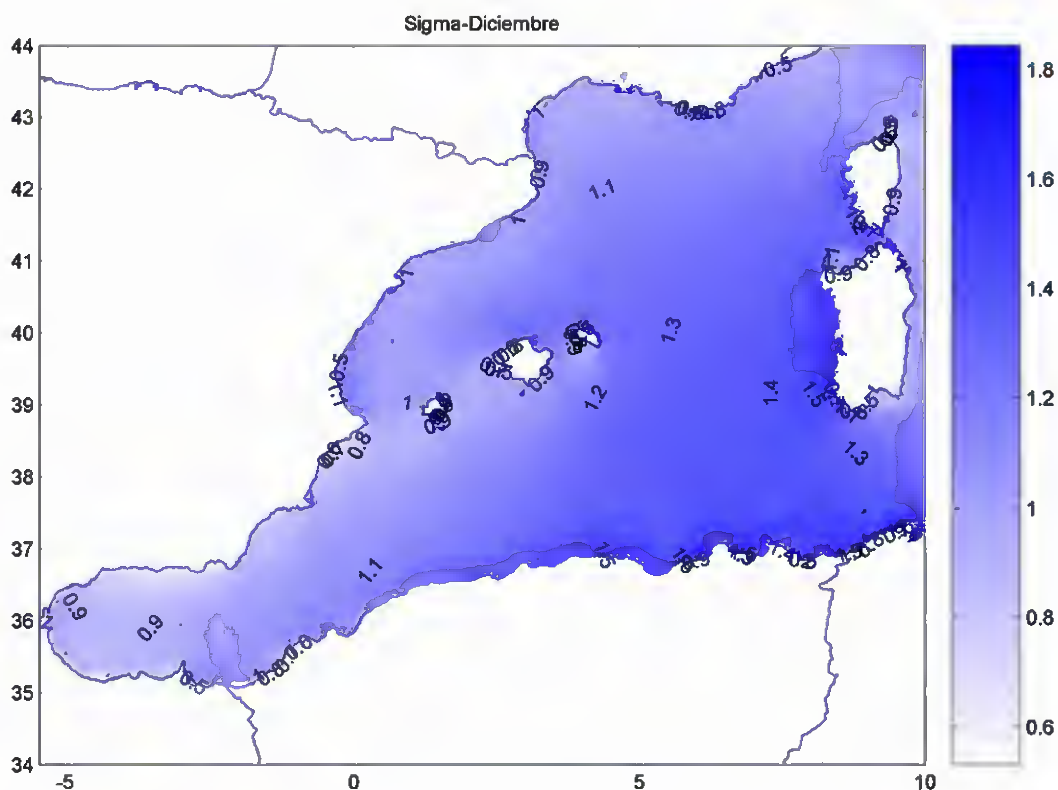


FIGURA 2.12. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, DEL PARÁMETRO  $\sigma$  de la distribución Lognormal, para las series de  $T_m$  de HIPOCAS para  $\tau_{12}$

También se determinan los parámetros que describen el régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ ) de las series de datos de las boyas. En la figura 2.13 se representa la evolución temporal de estos cuatro parámetros para la boya de Cabo de Palos. Se observa una oscilación anual en los parámetros del régimen medio, que evidencian las diferencias del clima marítimo entre el invierno y el verano;  $\mu$  y  $\sigma$  aumentan en invierno y disminuyen en verano. Estas pautas son generales para todas las costas españolas.



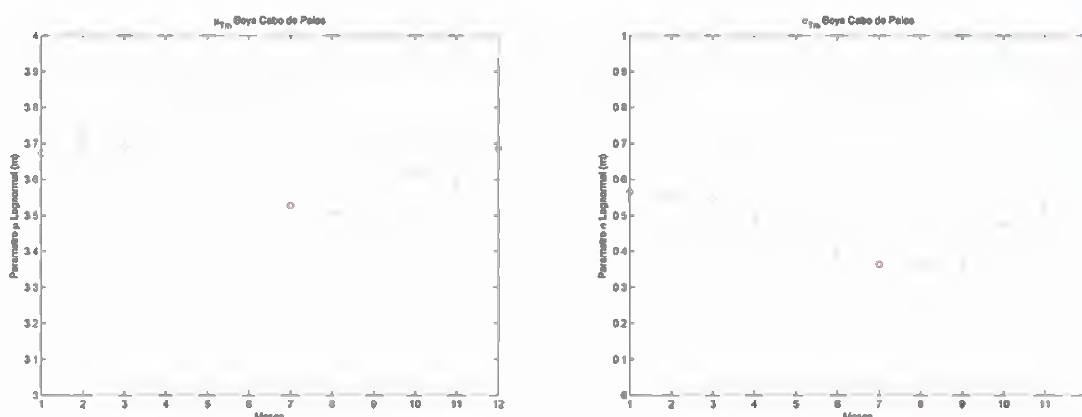


FIGURA 2.13. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE  $\mu$  Y  $\sigma$  DE LAS SERIES DE  $T_m$  DE LA BOYA DE CABO DE PALOS.

## 2.5. Descomposición en modos

La descomposición EOF (Empirical Orthogonal function) es un método estadístico que descompone una determinada variable numérica espacio-temporal en una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas. En el anexo B se explica detalladamente este método. La gran ventaja que se obtiene utilizando este método es poder explicar la mayor parte de la variación, tanto espacial como temporal, de la variable numérica con sólo unos pocos modos.

Se aplicará la técnica EOF a parámetros espacio-temporales tales como  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$ ,  $\sigma(\mathbf{x}, \tau)$ ,  $\lambda(\mathbf{x}, \tau)$ ,  $\delta(\mathbf{x}, \tau)$  o  $H_{s,99.5\%}(\mathbf{x}, \tau)$ ; siendo  $H_{s,99.5\%} = \lambda - \log(-\log(0.995))\delta$ . Por ejemplo en la figura 2.7 se representó  $\mu(\mathbf{x}, \tau_1)$ , en la figura 2.8 se representó  $\delta(\mathbf{x}, \tau_2)$ , en la figura 2.11 se representó  $\mu(\mathbf{x}, \tau_{11})$  y en la figura 2.12 se representó  $\sigma(\mathbf{x}, \tau_{12})$ . De forma genérica se denominarán estos parámetros como  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ .

La descomposición en modos es de la forma:

$$Z(\mathbf{x}, \tau) = Z_{MT}(\mathbf{x}) + f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + \dots + f_i(\mathbf{x})g_i(\tau) + \dots + f_n(\mathbf{x})g_n(\tau)$$

siendo

$Z_{MT}(\mathbf{x})$  es la media temporal de la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau)$

$f_i(\mathbf{x})$  son los  $i$  modos espaciales

$g_i(\tau)$  son la  $i$  amplitudes temporales

$i$  varía entre 1 y  $n$ , siendo  $n$  el número total de modos





En la figura 2.14 se representan los tres primeros modos y la media temporal del parámetro  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  del régimen medio de la distribución Lognormal de  $H_s$  de HIPOCAS, para una zona del mar Mediterráneo. La representación de los modos no tiene por qué tener ningún sentido físico, pero en esta figura se puede observar que la amplitud temporal del primer modo representa la fluctuación anual invierno-verano. En el resto de modos solamente se observan unos modos espaciales que representan la variación norte-sur, el segundo modo espacial y una variación este-oeste, el tercer modo espacial.

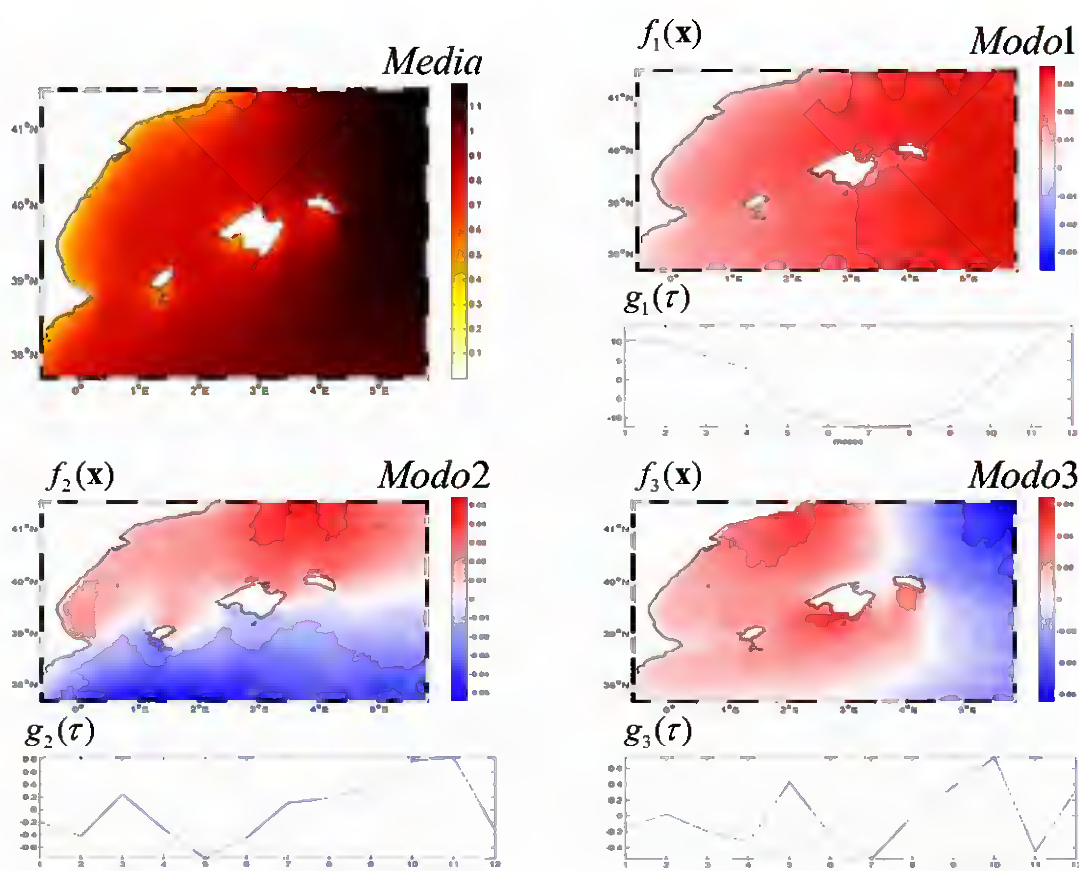


Figura 2.14. Media temporal y tres primeros modos del parámetro  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  de la distribución Lognormal de  $H_s$ , para la zona de Baleares

Para determinar cuantos modos se utilizarán para la calibración, se determina el número de modos que explican más del 95% de la varianza de cada variable numérica. En la tabla 2.1 se muestra el número máximo de modos que explican al menos el 95% de la varianza, para algunos parámetros de los distintos regímenes.



VARIABLE	RÉGIMEN	PARÁMETROS	NÚMERO DE MODOS
$H_s$	RÉGIMEN MEDIO	$\mu$	2
		$\sigma$	1
	RÉGIMEN MEDIO-ALTO	$H_{s,99.5\%}$	2
		$\lambda$	3
		$\delta$	3
$T_m$	RÉGIMEN MEDIO	$\mu$	2
		$\sigma$	1

Tabla 2.1

El número máximo de modos con los que se explican al menos el 95% de la varianza es tres. Por ese motivo, en la descomposición EOF se van a utilizar los cuatro primeros modos, asegurando explicar el 95% de la varianza. Con cuatro modos, en la mayor parte de las veces, se explica más del 98% de la varianza. En la tabla 2.2 se presenta el mínimo % de varianza que es explicada con los cuatro primeros modos de cada parámetro:

VARIABLE	RÉGIMEN	PARÁMETRO	VARIANZA EXPLICADA (%)
$H_s$	RÉGIMEN MEDIO	$\mu$	>99.7
		$\sigma$	>99.8
	RÉGIMEN MEDIO-ALTO	$H_{s,99.5\%}$	>98.7
		$\lambda$	>97.5
		$\delta$	>98.4
$T_m$	RÉGIMEN MEDIO	$\mu$	>99.5
		$\sigma$	>99.7

Tabla 2.2

## 2.6 Discusión sobre los parámetros de las distribuciones

Para la elección de los parámetros con los que se calibran los distintos regímenes, se debe tener en cuenta que debe existir una relación biunívoca entre cada régimen y sus parámetros. Otros criterios adicionales que se han tenido en cuenta para la elección de los parámetros que se deben calibrar de cada régimen son:

- Poder explicar el mayor % de varianza con sólo cuatro modos de su descomposición EOF.





- Tener una determinación sencilla, para no elevar los tiempos de ejecución.
- Tener sentido físico, en la medida de lo posible, para poder interpretar resultados o identificar errores.

Teniendo en cuenta todas estas premisas se han seleccionado los siguientes parámetros de cada régimen para ser calibrados:

Para el régimen medio de  $H_s$  se han elegido los parámetros  $\mu$  (media de la distribución lognormal) y  $\sigma$  (desviación típica de la distribución lognormal). Es importante señalar que  $\mu$  y  $\sigma$  no son  $\mu^*$  y  $\sigma^*$  (ver definiciones en el anexo A). Se han empleado  $\mu$  y  $\sigma$  porque son parámetros mayores que cero y con un mayor sentido físico.

Para el régimen medio-alto de  $H_s$  se han elegido los parámetros  $H_{s,99.5\%}$  (percentil del 99.5% de  $H_s$ ) y  $\delta$  (parámetro de escala del ajuste al papel Gumbel de máximos). Se han empleado  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  en lugar de  $\lambda$  y  $\delta$  (ver definiciones en el anexo A) porque son parámetros con un mayor sentido físico, mayores que cero y que explican un mayor % de la varianza con sólo 4 modos de la descomposición EOF.

Para el régimen medio de  $T_m$  se han elegido los parámetros  $\mu$  (media de la distribución lognormal) y  $\sigma$  (desviación típica de la distribución lognormal). Al igual que para el régimen medio de  $H_s$  se han empleado  $\mu$  y  $\sigma$  porque son parámetros mayores que cero y con un mayor sentido físico.

## 2.7. Calibración boya a boya

Para realizar la calibración, se deben comparar los parámetros que se van a calibrar, determinados a partir de los datos de HIPOCAS, con los parámetros determinados a partir de los datos de las boyas. Esta comparación se debe hacer definiendo ambos parámetros en los mismos términos, o sea con los mismos regímenes y con oleajes con las mismas características.

Tener series de oleaje definidas con las mismas características tiene mucha importancia. Pues a partir de ellos se determinan los parámetros de ajuste de las distribuciones de los distintos regímenes y con ellos se sacan los parámetros que se van a calibrar.





Los datos que se tienen de HIPOCAS han sido obtenidos a partir del modelo WAM pero no simula la refracción; por lo que para las profundidades que tienen los puntos de la malla cercanos a las boyas, es como si estuviesen en profundidades indefinidas. Esto es debido a que, aunque la difracción y el asomeramiento si que son simulados por el modelo WAM, para las profundidades que se tienen, estos fenómenos no modifican el oleaje.

Las boyas están, en general, en profundidades reducidas o intermedias, por lo que las series de oleaje de las boyas están afectadas por refracción, difracción y asomeramiento. Las series de oleaje de las boyas se propagarán hasta profundidades indefinidas, para poder compararse con las series de HIPOCAS.

Por lo tanto, se corregirán todas las series de oleaje que estén en profundidades reducidas o intermedias, propagando hasta profundidades indefinidas (GIOC, 2000).

Para la calibración espacial, en lugar de utilizar las series de oleajes propagados hasta indefinidas, se han utilizado los parámetros de calibración de estos con los puntos HIPOCAS. La transformación es del tipo  $H_{BoyaIndef} = a + b(H_{HIPOCAS})^c$ , con  $a$ ,  $b$  y  $c$  los parámetros de la corrección de las boyas hasta indefinidas. Con esta transformación se pierde algo de información de las boyas y hace que sea homotética con HIPOCAS. Por eso al comparar los datos de HIPOCAS con los de las boyas corregidas presentan formas similares. En las boyas que están en profundidades indefinidas se utilizan los datos directamente, sin transformación.

Este procedimiento se detalla en el apartado de calibración puntual de boyas numéricas.

## 2.8. Parámetros de la calibración

Los parámetros que se van a calibrar son:  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  y  $\sigma(\mathbf{x}, \tau)$  para el régimen medio de  $H_s$ ,  $H_{s,99.5\%}(\mathbf{x}, \tau)$  y  $\delta(\mathbf{x}, \tau)$  para el régimen medio-alto de  $H_s$  y  $\mu(\mathbf{x}, \tau)$  y  $\sigma(\mathbf{x}, \tau)$  para el régimen medio de  $T_m$ . Para cualquiera de ellos se hace la descomposición, con la técnica EOF, en cuatro modos:

$$Z(\mathbf{x}, \tau) = Z_{MT}(\mathbf{x}) + f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + f_3(\mathbf{x})g_3(\tau) + f_4(\mathbf{x})g_4(\tau)$$

con:

$Z_{MT}(\mathbf{x})$ , la media temporal





$f_i(\mathbf{x})$ , cada uno de los modos espaciales

$g_i(\tau)$ , cada una de las amplitudes temporales

El método de calibración propuesto trata de deformar los campos espacio-temporales de los parámetros, para que al compararlos con los de las boyas, la diferencia sea mínima. Por ese motivo, se asume como hipótesis que el parámetro calibrado  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  es una combinación de los cuatro modos obtenidos en la descomposición EOF  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ , en los cuales se introducen unos parámetros que distorsionan cada modo.

En una primera aproximación al problema se puede considerar que  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  es una combinación lineal de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ :

$$Z_c(\mathbf{x}, \tau) = a_0 Z_{MT}(\mathbf{x}) + a_1 f_1(\mathbf{x}) g_1(\tau) + a_2 f_2(\mathbf{x}) g_2(\tau) + a_3 f_3(\mathbf{x}) g_3(\tau) + a_4 f_4(\mathbf{x}) g_4(\tau) + c_0$$

En este supuesto  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, c_0\}$  son los parámetros de la calibración; que aumentan o disminuyen el valor del parámetro  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ , sin deformar ni espacialmente ni temporalmente el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ . Si  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  y  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  coincidiesen, entonces  $a_i = 1$  y  $c_0 = 0$ .

Para deformar tanto espacialmente como temporalmente el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  se introducen dos nuevos grados de libertad:

- El parámetro  $b_0$  deforma espacialmente el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ , si no hiciese falta tomaría el valor 1. Como todos los posibles parámetros a calibrar ( $Z(\mathbf{x}, \tau)$ ) son positivos, sus medias temporales ( $Z_{MT}(\mathbf{x})$ ) también son siempre positivas, por lo que  $Z_{MT}(\mathbf{x})^{b_0}$  toma siempre valores reales positivos.
- El parámetro  $b_1$  deforma temporalmente el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ , si no hiciese falta tomaría el valor 1. Como  $g_1(\tau)$  toma valores positivos y negativos, se toma el valor absoluto de lo que se eleva a la potencia  $b_1 - 1$ , dejando sin tomar valor absoluto lo que se eleva a la potencia 1; de esta forma se mantiene el signo de  $g_1(\tau)$  y  $[abs(g_1(\tau))]^{b_1 - 1}$  toma siempre valores reales positivos. En general, y como se vio en la figura 2.14, el primer modo está asociado a las variaciones estacionales del clima marítimo. Por ese motivo se ha optado por dotar de un grado de libertad más ( $b_1$ ). Permitiendo una variación no lineal del clima marítimo a lo largo del año.





Se tiene entonces la siguiente expresión potencial de  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$ , que es la que se va a utilizar:

$$Z_c(\mathbf{x}, \tau) = a_0 Z_{MT}(\mathbf{x})^{b_0} + a_1 f_1(\mathbf{x}) g_1(\tau) [abs(g_1(\tau))]^{b_1-1} + a_2 f_2(\mathbf{x}) g_2(\tau) + a_3 f_3(\mathbf{x}) g_3(\tau) + a_4 f_4(\mathbf{x}) g_4(\tau) + c_0$$

donde  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  son los parámetros de la calibración a obtener.

Se podría construir también una expresión potencial con términos como  $[abs(g_1(\tau))]^{b_1-1}$  para cada modo espacial y para cada amplitud temporal de manera que se pueda deformar más el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ . Este planteamiento disminuye algo el error evaluado en las posiciones de las boyas, pero deforma mucho el campo de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  en el resto de posiciones, de forma que para mejorar  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  en las posiciones de las boyas se empeora en el resto de las posiciones, sobre todo en mar abierto. Esta opción implica introducir 7 nuevos parámetros, que complicarían el proceso de búsqueda de la mejor combinación de parámetros aumentando notablemente los tiempos de ejecución. Por todo esto se desecha utilizar esta opción.

Para los parámetros elegidos  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$ , no todos los valores posibles son permitidos. Se ha decidido utilizar un  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  de manera que los parámetros oscilen en torno al valor 1, salvo  $c_0$ , por eso el rango de valores posibles de todos y cada uno de los parámetros se especifica en la tabla 2.3.

PARÁMETROS	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
$a_0$	0	2.5
$a_1$	0	2.5
$a_2$	0	2.5
$a_3$	0	2.5
$a_4$	0	2.5
$b_0$	0	2.5
$b_1$	0	2.5
$c_0$	0	2.5

Tabla 2.3







De esta manera se limita la posible distorsión de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  en la calibración, así se restringe que para conseguir que los datos de HIPOCAS coincidan con los de las boyas se obtengan valores imposibles en otras posiciones. Esto acompaña a la idea de que se quiere calibrar los datos de HIPOCAS, que hay que mejorarlos para que se aproximen a los datos por las boyas, no hay que cambiarlos drásticamente ya que se parte de una base de datos que se asume es correcta desde un punto de vista cualitativo.

## 2.9. Función objetivo: error a minimizar

Una vez definida  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$ , como combinación potencial de los cuatro modos de la descomposición EOF de cada parámetro a calibrar de cada régimen, de la base de datos de HIPOCAS; se sabe cuales son los parámetros de la calibración a obtener, o sea  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  son las incógnitas a obtener en cada calibración.

En el proceso de calibración se evalúa la diferencia entre  $Z_c(\mathbf{x}, \tau)$  y  $Z_b(\mathbf{x}, \tau)$ , siendo este último el valor del parámetro a calibrar determinado a partir de los datos de las boyas corregidas a profundidades indefinidas. Esta diferencia de valores se llevará a cabo en las mismas posiciones, o sea en las posiciones de las boyas  $\mathbf{x}_i$ , y para todas las unidades de tiempo  $\tau_j$ , los doce meses ( $\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}$ ).

Cabe mencionar que las boyas no siempre coinciden con un punto de la malla de HIPOCAS, en esos casos se tomará el más próximo. También hay que resaltar que las series de oleaje de las boyas son más cortas que las series de oleajes proporcionadas por el modelo WAM de HIPOCAS (44 años); por lo que  $Z_b(\mathbf{x}, \tau)$  se determina a partir de series de oleaje más cortas. Para paliar este problema se desecha la utilización de las boyas con registros de oleajes de menos de 5 años. En la tabla 2.4 se detalla el número mínimo de meses en los que hay datos para todas las boyas del Mediterráneo, tanto para el periodo en el que hay datos de HIPOCAS, como en el total de los registros de las boyas; los cuadros temporales completos que muestran cuando se registraron datos de todas las boyas se detallan en la figura 2.15.



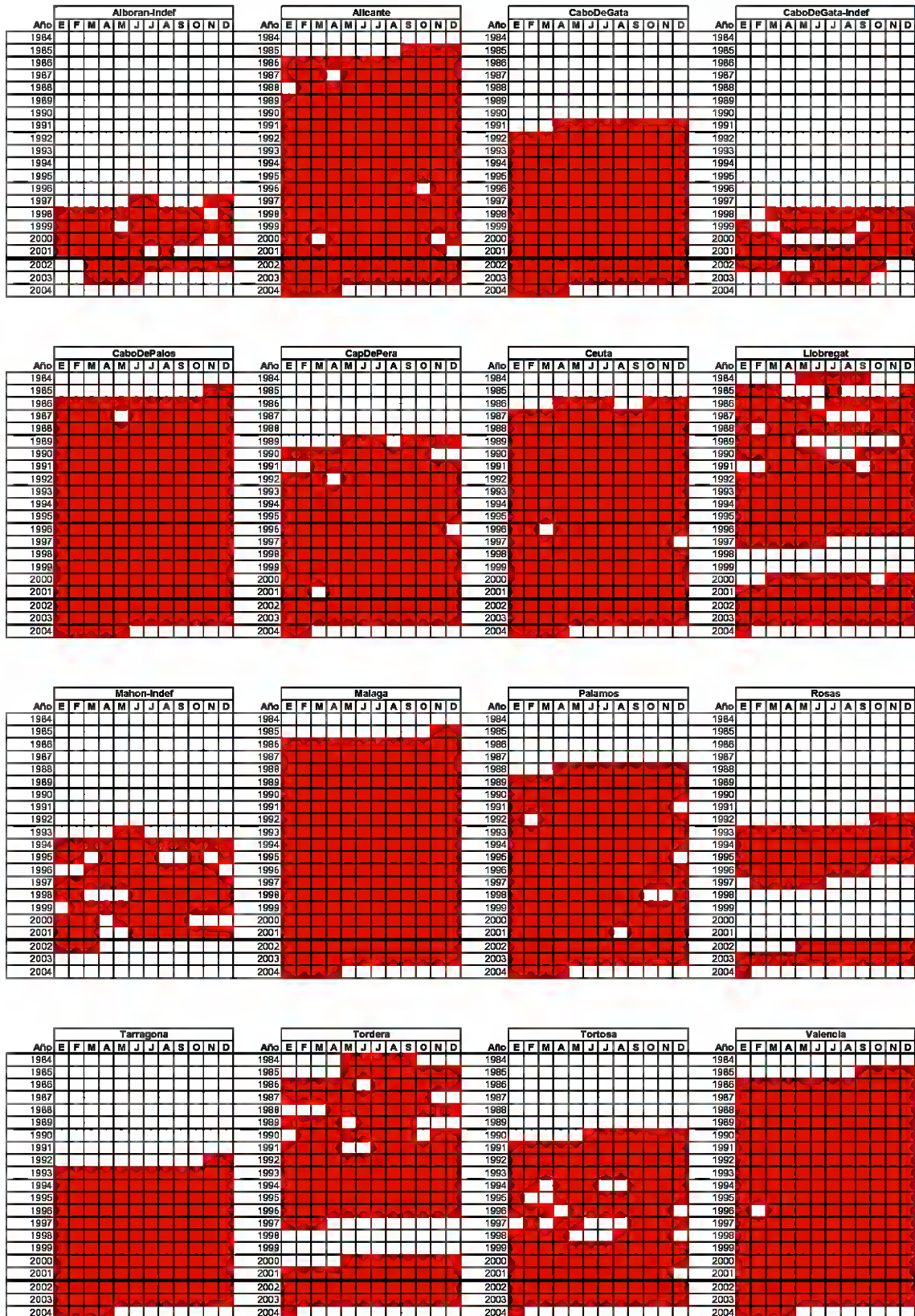


Figura 2.15. Registros de las boyas







BOYA	Nº MÍNIMO MESES ENTRE 1958-2001	Nº MÍNIMO MESES EN TOTAL
ALBORAN-INDEF	2	3
ALICANTE	15	18
CABODEGATA	10	13
CABODEGATA-INDEF	2	3
CABODEPALOS	15	18
CAPDEPERA	11	13
CEUTA	14	17
LLOBREGAT	11	13
MAHON-INDEF	5	5
MALAGA	16	18
PALAMOS	12	14
ROSAS	4	6
TARRAGONA	9	11
TORDERA	11	14
TORTOSA	8	10
VALENCIA	15	18

Tabla 2.4

Por lo tanto de las 16 boyas que se tienen en el mediterráneo, no se van a utilizar las series de datos de las boyas: Alboran-Indef, CaboDeGata-Indef y Rosas. Se disponen entonces de 13 boyas con series temporales de datos suficientemente largas válidas para obtener los regímenes medios mensuales.

Para obtener  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  se evaluará la diferencia entre  $Z_B(\mathbf{x}, \tau)$  y  $Z_C(\mathbf{x}, \tau)$ , en los mismos  $\mathbf{x}_i$  y  $\tau_j$ . Resultando finalmente un problema de optimización en el cual se debe definir la función objetivo a minimizar ( $J$ ), que es un error cuadrático relativo ponderado que se puede definir como:

$$J = \sum_i \left\{ \sum_{j=1}^{12} \left[ \frac{Z_B(\mathbf{x}_i, \tau_j) - Z_C(\mathbf{x}_i, \tau_j; \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\})}{R(\mathbf{x}_i, \tau_j)} \right]^2 P(\mathbf{x}_i, \tau_j) \right\}$$

El índice  $i$  indica la posición de los puntos de la malla HIPOCAS. El índice  $j$  indica la unidad de tiempo (12 meses).  $R(\mathbf{x}, \tau)$  es el término que relativiza el error cuadrático, es decir, cuando  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  toma diferentes valores, los homogeniza para que tengan el mismo peso al minimizar  $J$ . Así en este trabajo se utilizará como  $R(\mathbf{x}, \tau)$  la media temporal en cada boya:

$$R(\mathbf{x}, \tau) = R(\mathbf{x}) = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} Z_B(\mathbf{x}, \tau_j)$$



$P(x, \tau)$  es el término que da más o menos peso a cada sumando de la función objetivo. Aquí se distribuirá distintos pesos en función del área de influencia de cada boya, que se evaluará proporcionalmente a su tramo de costa. Se ha utilizado una función peso que pondera todos los meses por igual, por lo que se tiene un peso para cada boya, que normalizado será:

$$P(x, \tau) = P_N(x) = \frac{P(x)}{\sum_i P(x_i)}$$

En la figura 2.16 se presentan los pesos  $P(x)$  asociados a cada una de las boyas seleccionadas. El valor del peso está asociado al número de puntos de HIPOCAS de la costa cercanos a las boyas.

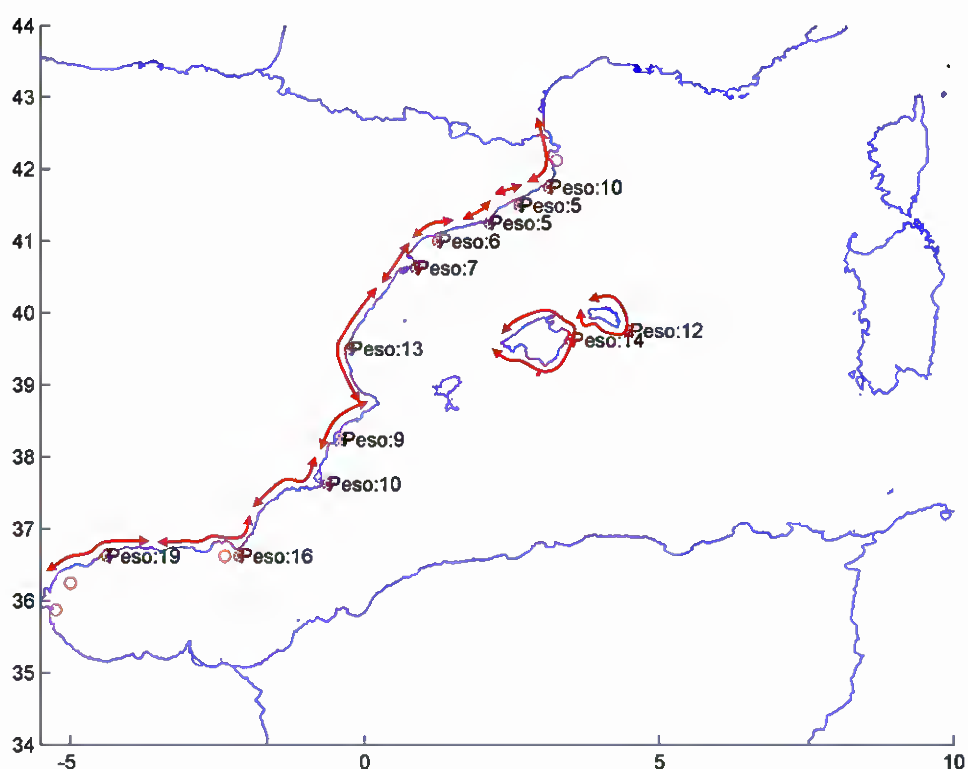


Figura 2.16. Pesos de las boyas del litoral mediterráneo español.

Finalmente  $J$  se define como:



$$J = \sum_i \left\{ \sum_{j=1}^{12} \left[ \frac{Z_B(\mathbf{x}_i, \tau_j) - Z_C(\mathbf{x}_i, \tau_j; \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\})}{R(\mathbf{x}_i)} \right]^2 P_N(\mathbf{x}_i) \right\}$$

## 2.10. Método de minimización del error

Para buscar la combinación de parámetros  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  que hacen mínimo el valor de la función objetivo  $J$  se pueden utilizar varios procedimientos:

- Métodos de búsqueda en malla (generalized gridding methods)
- Métodos basados en simulación Monte Carlo
- Métodos de búsqueda selectiva (greedy search)
- Métodos de simulación de recocido (simulated annealing)
- Métodos basados en algoritmos genéticos
- Método de evolución y mezcla de equipos de búsqueda: SCE-UA (shuffled complex evolution method – Universidad de Arizona)

Se comenzó utilizando un método de búsqueda en malla, con búsqueda local, para encontrar la solución que minimice  $J$ ; esto resultó muy ineficiente pues se empleaba mucho tiempo computacional (50 horas en Pentium IV 2.4 Ghz para cada prueba de calibración) y no siempre se llegaba a una buena solución.

Hay que destacar que  $J$  es una función no lineal y contiene ocho parámetros de la calibración que hay que determinar. La tarea de encontrar  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  que minimicen  $J$  no siempre es posible, pues puede ser que se encuentre un mínimo local, pero que no sea el mínimo absoluto de la función. También puede ser que dentro del rango de valores posibles de  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  se encuentren soluciones al problema de optimización que obtengan  $Z_C(\mathbf{x}, \tau)$  sin sentido.

Finalmente se adoptó un método de evolución y mezcla de equipos de búsqueda, el SCE-UA. (DUAN et al., 1994). Este método es el más utilizado en calibración automática de modelos hidrológicos de cuenca y de hidrología urbana. Está basado en 4 conceptos:





- Combinación de procedimientos deterministas y aleatorios.
- Evolución de “equipos de puntos” (complex) en el espacio N-dimensional.
- Evolución competitiva - algoritmo genético.
- Mezclado de equipos, que permiten un proceso de búsqueda mejor.

Se ha utilizado el método SCE-UA, con 5 equipos de búsqueda y 10000 iteraciones, llegando siempre a la solución buscada en muy poco tiempo (10 minutos en Pentium IV 2.4 Ghz). En la figura 2.17 se representa la evolución del error ( $J$ ) a lo largo de las iteraciones en la calibración de la zona de Andalucía. Con 1000 o 2000 casi siempre se llega al mismo error en todas las ejecuciones de calibraciones realizadas.

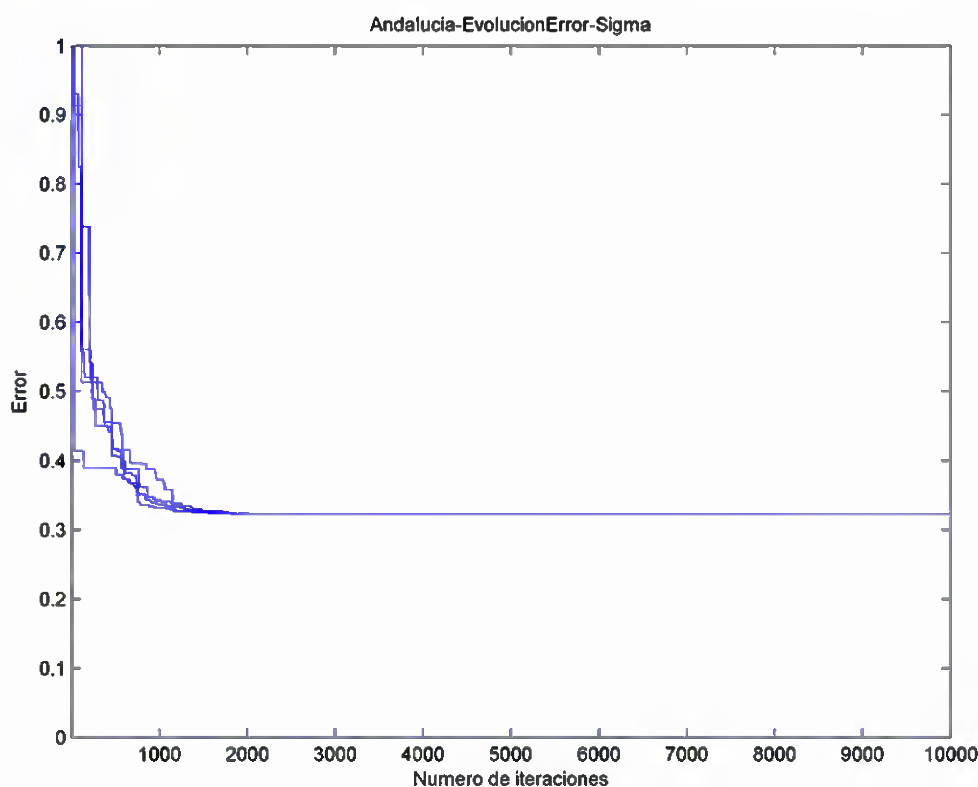


Figura 2.17. Evolución de la función objetivo ( $J$ ) para 5 simulaciones





## 2.11. Parámetros finales

Una vez que se tienen calibrados todos los parámetros de todos los regímenes ( $Z(x, \tau)$ ), se reconstruyen los regímenes mensuales y con ellos, para cada parámetro de clima marítimo ( $H_s$  o  $T_m$ ), se hacen simulaciones de Monte Carlo para construir series calibradas de  $H_s$  o  $T_m$  para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ .

Las simulaciones de Monte Carlo parten de un número aleatorio (normal estándar  $N(0,1)$ ) de números, que será igual a la longitud de la serie que se quiere reproducir; se calcula la probabilidad que acumula cada uno (con la  $N(0,1)$ ) y con esa probabilidad acumulada se determina, para cada conjunto de parámetros de cada régimen en el que se encuentre, su  $H_s$  o  $T_m$ . Así se va generando la serie completa, que puede estar generada a partir de diferentes regímenes, cada uno definido en distintos intervalos de probabilidad. En la figura 2.18 se esquematiza el método de Monte Carlo para  $H_s$ .

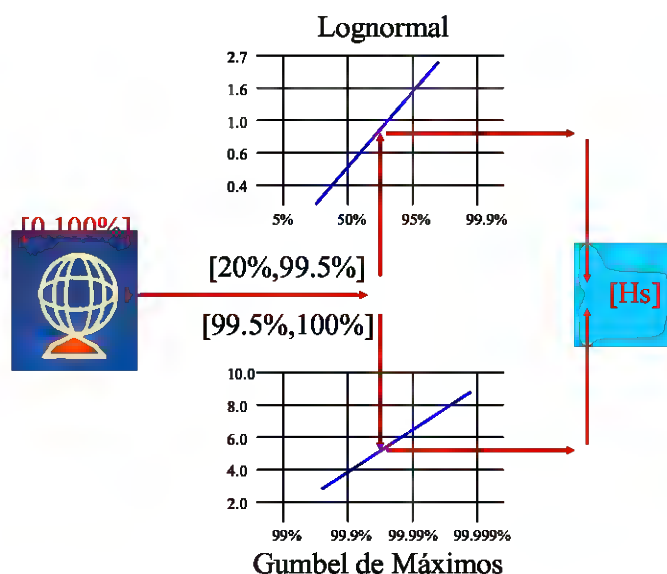


Figura 2.18. Esquema del método de Monte Carlo para  $H_s$

Se tiene finalmente series de  $H_s$  y  $T_m$  calibradas para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ . El método de calibración teóricamente ya está terminado con los regímenes medios mensuales de  $H_s$  y  $T_m$  calibrados para cada  $x_i$  y para cada  $\tau_j$ . Pero se trata de simplificar aún más, para ello se busca una relación sencilla entre las series de  $H_s$  y  $T_m$  antes y después de calibrar. Así





se puede volver a recuperar la variable tiempo, o sea series temporales de 44 años de datos cada tres horas.

Por lo tanto se define una función potencial que compara, en cada  $x_i$  y en cada  $\tau_j$ , la serie de  $H_s$  o  $T_m$  inicial con la serie  $H_s$  o  $T_m$  calibrada, por percentiles. También se podrían definir distintas funciones potenciales para distintos intervalos de percentiles. Los percentiles para los que se han hecho los ajustes es un vector de probabilidad acumulada equiespaciado en la variable reducida del papel de Gumbel de Maximos. Se pueden utilizar otros vectores de probabilidad, equiespaciado en probabilidad acumulada, o en otras variables reducidas de otros papeles. Pero los resultados obtenidos con la variable reducida del papel de Gumbel de Maximos ( $\eta = -\log[-\log(v)]$ ) da un peso suficiente y no excesivo a la parte medio-alta del régimen medio.

Los percentiles para los que se han hecho los ajustes de  $H_s$  es un vector de probabilidad acumulada equiespaciado en la variable reducida del papel de Gumbel de máximos desde el 20% hasta el 99.995%. Y los percentiles para los que se han hecho los ajustes de  $T_m$  es un vector de probabilidad acumulada equiespaciado en la variable reducida del papel de Gumbel de máximos desde el 1% hasta el 99%.

Por ejemplo, una posible transformación potencial, definida para todo el campo de alturas de ola, podría ser:

$$H_{s,c} = bH_s^c$$

siendo  $H_{s,c}$ , la altura de ola significativa calibrada

$H_s$ , la altura de ola significativa sin calibrar

$b$  y  $c$  los parámetros finales de la calibración de la altura de ola significativa

Un ejemplo de este ajuste de  $H_s$  para la posición de la boya de Palamós se muestra en la figura 2.19, en la que se confrontan los percentiles de  $H_s$  de HIPOCAS antes y después de calibrar.



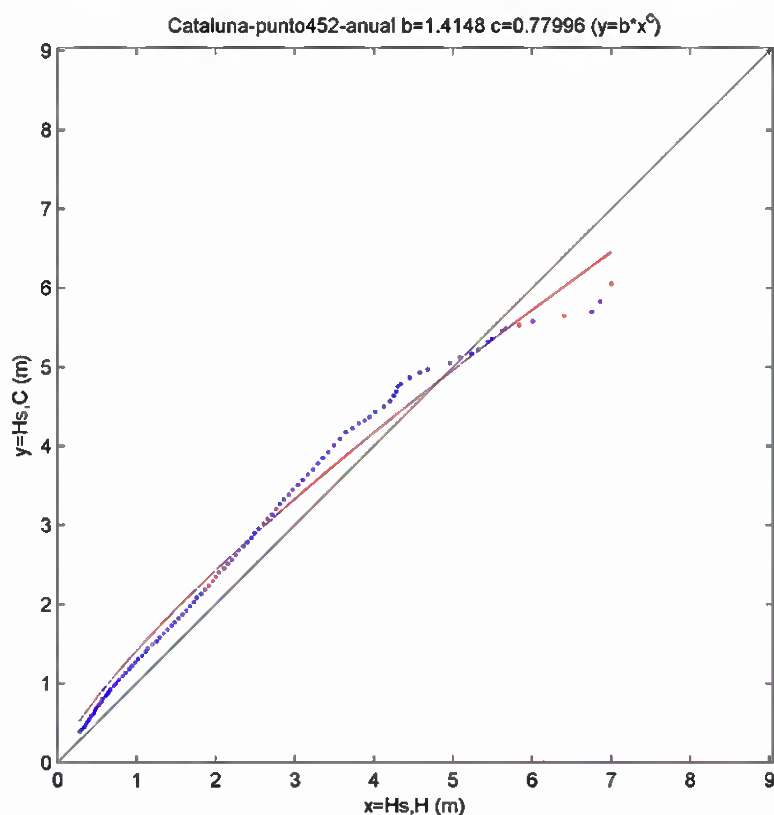


Figura 2.19. Ajuste potencial en un tramo

También pueden definirse transformaciones potenciales distintas para cada intervalo de probabilidad, así por ejemplo para la  $H_s$ , como se definieron dos regímenes distintos uno entre 20% y 99.5% y otro entre 99.5% y 100%, se definen transformaciones potenciales como las siguientes:

$$H_s, c = b_1 H_s^{c_1}; H_{s,20\%} < H_s < H_{s,99.5\%}$$

$$H_s, c = a_2 + b_2 H_s^{c_2}; H_{s,99.5\%} < H_s < H_{s,100\%}$$

Un ejemplo de este ajuste de  $H_s$  para la posición de la boya de Palamós se muestra en la figura 2.20.



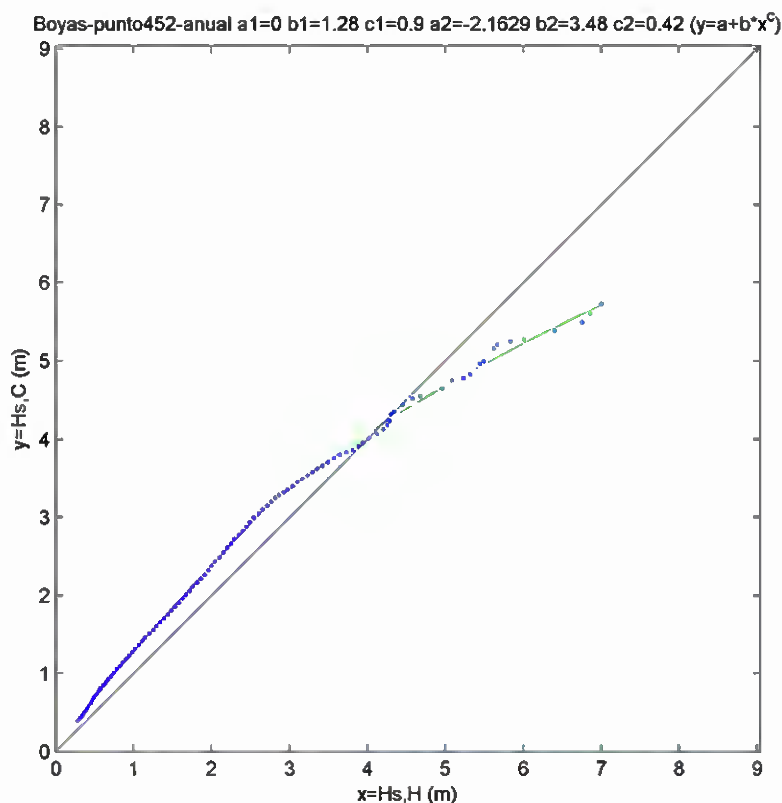


Figura 2.20. Ajuste potencial en dos tramos

Las figuras 2.19 y 2.20 son ajustes a las series de  $H_s$ , de todas las unidades de tiempo juntas, o sea anuales. Se puede también hacer para cada  $\tau_j$  un ajuste, en la figura 2.21 se muestran los ajustes mes a mes para la posición de la boya de Palamós. En los ajustes realizados mes a mes, los ajustes en la rama alta son peores que cuando se realizan agregados (anuales). Esto puede ser debido a que las series mensuales en la boya tienen una duración más limitada, produciéndose una dispersión más pronunciada en los eventos extremos.





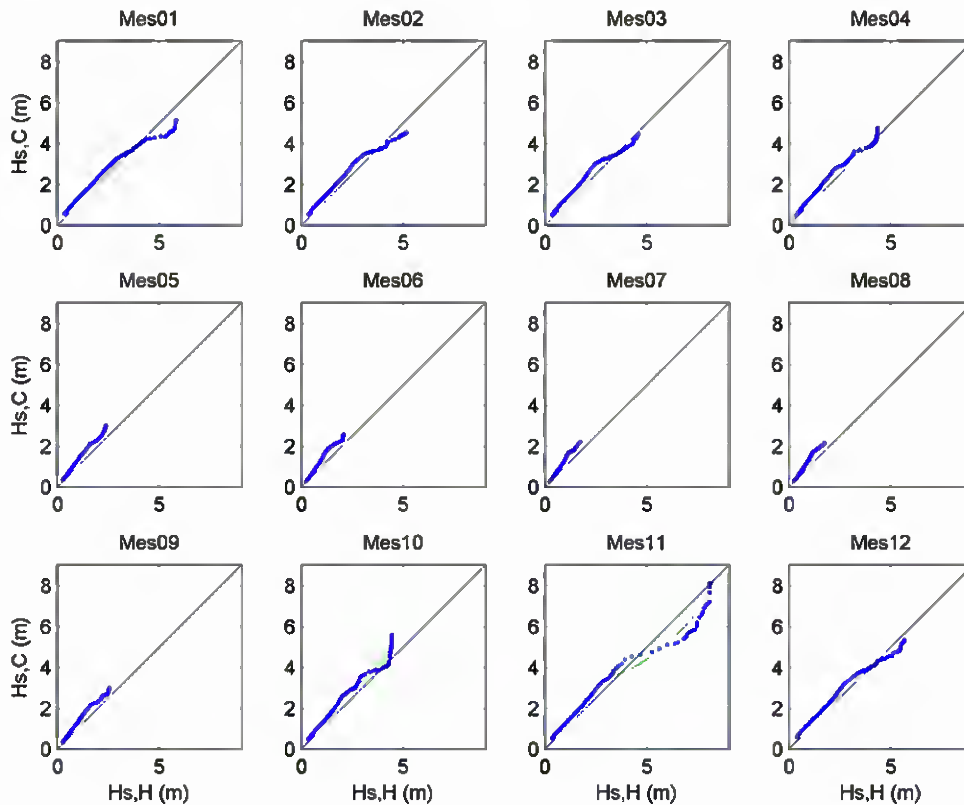


Figura 2.21. Ajuste potencial en dos tramos, para cada  $\tau_j$

En este trabajo, se va a utilizar un ajuste potencial anual en un tramo (ver figura 2.19), pues sin perder mucha información de la calibración realizada se resume la calibración realizada en cada punto de la base de datos de HIPOCAS en dos parámetros,  $b(x)$  y  $c(x)$ , pudiéndose reconstruir con ellos la serie temporal de  $H_S$  o  $T_m$  calibrada. Por lo tanto se tiene:

$$H_S, c(x, t) = b(x)H_S(x, t)^{c(x)}, \text{ para } H_S$$





con:

$H_S, c(\mathbf{x}, t)$ , es la serie temporal de  $H_S$  calibrada

$H_S(\mathbf{x}, t)$ , es la serie temporal de  $H_S$  sin calibrar calibrada

$b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$  son los parámetros finales de la calibración de  $H_S$

y

$T_m, c(\mathbf{x}, t) = b_T(\mathbf{x})T_m(\mathbf{x}, t)^{c_T(\mathbf{x})}$ , para  $T_m$

con:

$T_m, c(\mathbf{x}, t)$ , es la serie temporal de  $T_m$  calibrada

$T_m(\mathbf{x}, t)$ , es la serie temporal de  $T_m$  sin calibrar calibrada

$b_T(\mathbf{x})$  y  $c_T(\mathbf{x})$  son los parámetros finales de la calibración de  $T_m$ .

## 2.12. Zonificación

Debido a que la calidad de los datos del modelo WAM de oleaje de HIPOCAS no es homogéneo en el mar Mediterráneo (EPPE, 2003) y que la distribución de las boyas en la costa no es muy regular, se ha hecho una zonificación del litoral español para calibrar independientemente unas zonas de otras. En la figura 2.22 se sitúan los índices de correlación entre los resultados del modelo WAM y los datos suministrados por el satélite Topex-Pseidon para  $H_S$ , para distintas zonas del litoral mediterráneo español. Así, de esta manera, si una zona no tiene buenos resultados, no se empeora el resto de los resultados. En cada una de las zonas definidas, habrá un mínimo de dos boyas de oleaje para calibrar.



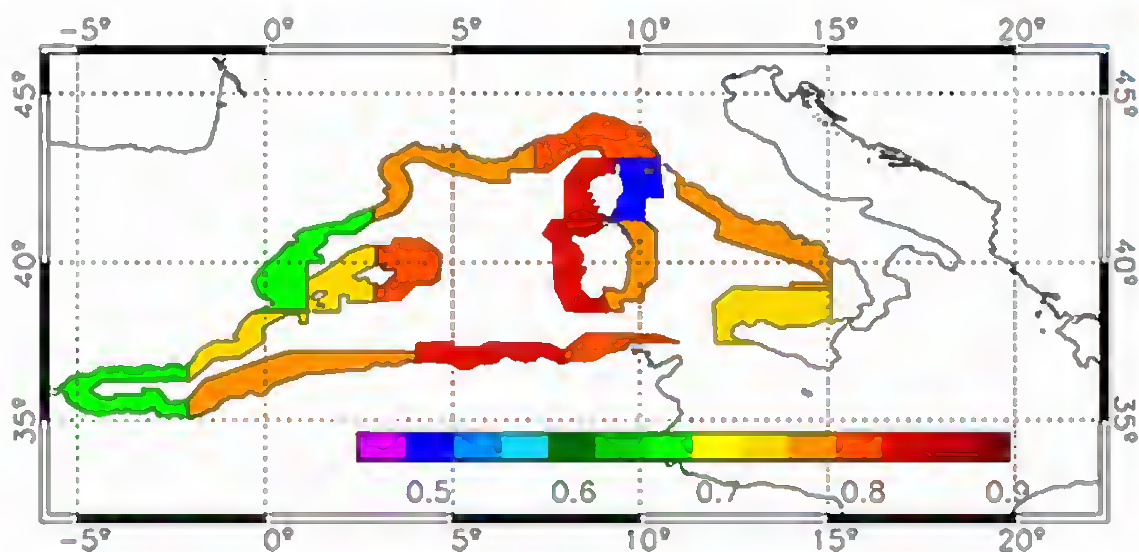


Figura 2.22. Índice de correlación entre  $H_s$  de HIPOCAS y  $H_s$  de Topex-Poseidon (EPPE, 2003) en el mar Mediterráneo.

Hay que señalar que el modelo de oleaje considera que el estrecho de Gibraltar está cerrado, por lo que los resultados en la zona de Andalucía son peores que el resto, ello es debido a la no entrada de energía del oleaje del océano Atlántico.

En la figura 2.23 se dibujan las zonas que se han utilizado para la calibración del mar Mediterráneo, pues si se toma, por ejemplo, todo el mar Mediterráneo en una sola zona de calibración, los errores cometidos son mucho mayores.



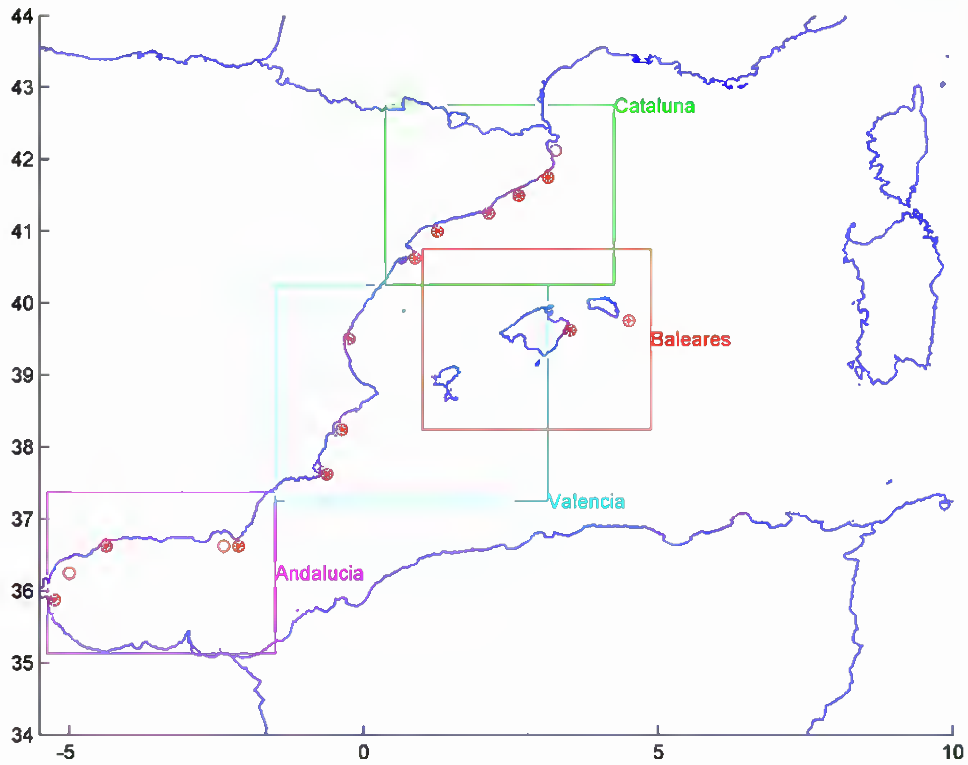


Figura 2.23. Zonas de calibración del mar Mediterráneo.

En la tabla 2.5. se describen las distintas zonas seleccionadas para la calibración, indicando el área calibrada de HIPOCAS y las boyas utilizadas para ello.





ZONAS	BOYAS	LONGITUD		LATITUD	
		INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
ANDALUCIA	CABODEGATA	-5.375°	-1.5°	35.125°	37.375°
	MALAGA				
	CEUTA				
BALEARES	CAPDEPERA	1°	4.875°	38.25°	40.75°
	MAHON-INDEF				
CATALUNA	LLOBREGAT	0.375°	4.25°	40.25°	42.75°
	PALAMOS				
	TARRAGONA				
	TORDERA				
	TORTOSA				
VALENCIA	ALICANTE	-1.5°	3.125°	37.25°	40.25°
	CABODEPALOS				
	VALENCIA				
CANTABRICO	BILBAO	-7	-12.5	43.5	45
	BILBAO-INDEF				
	CABODEPENAS-INDEF				
	GIJON				
GALICIA	ESTACADEBARES-INDEF	-11	-7	40	45
	FIGUEIRADAFOZ				
	LACORUNA				
	SILLEIRO				
	SILLEIRO-INDEF				
CADIZ	CADIZ	-9.25	-6	35	37.25
	FARO				
	GOLFODECADIZ-INDEF				
CANARIAS	GRANCANARIA-INDEF	-19	-12.5	27	30
	LASPALMASI				
	TENERIFE				
	TENERIFE-INDEF				

Tabla 2.5. Zonificación del litoral español para la calibración

### 2.13. Resumen de la calibración de $H_s$ y $T_m$

En este apartado se resume y esquematiza los pasos seguidos en la calibración de  $H_s$  y  $T_m$ , que anteriormente se han ido explicando con mayor detalle. En la figuras 2.24 y 2.25 se presentan los organigramas de calibración que más abajo se comentan, en ellos el índice  $i$  indica la posición  $x_i$  y el índice  $j$  la unidad de tiempo  $\tau_j$ .



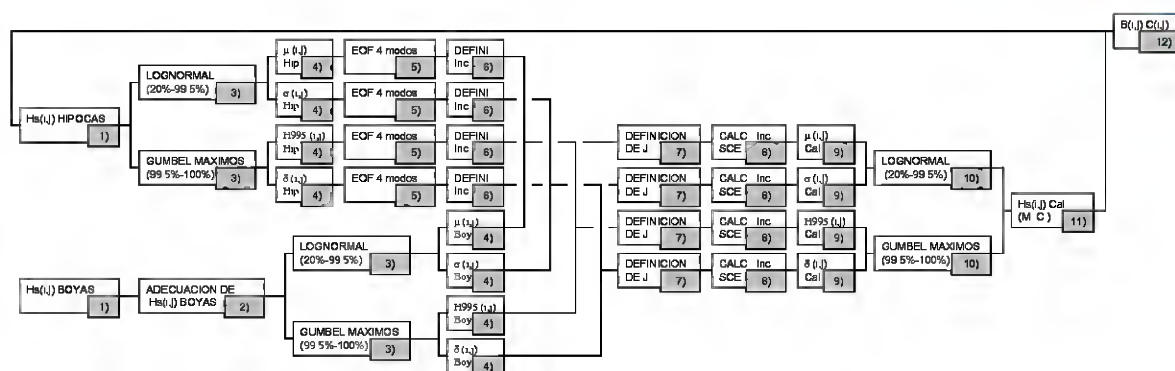


Figura 2.24. Organigrama de calibración de  $H_s$

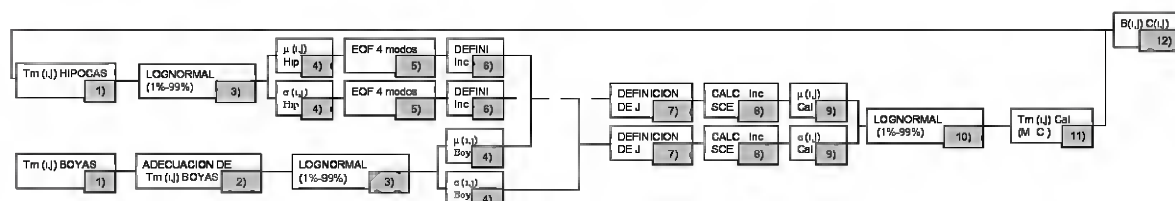


Figura 2.25. Organigrama de calibración de  $T_m$

1. Bases de datos de  $H_s$  y  $T_m$ , de HIPOCAS o de las boyas, ordenados según las posiciones  $x_i$  (puntos de la malla de HIPOCAS) y las unidades de tiempo  $\tau_j$  (meses).
2. Adecuación de los registros de las boyas a unas condiciones comparables con las series de datos de HIPOCAS, es decir, propagar hasta profundidades indefinidas.
3. Definición de los regímenes que se van a ajustar a cada intervalo de probabilidad acumulada.
4. Determinación de los parámetros a calibrar de cada régimen.
5. Descomposición en EOF de los parámetros a calibrar de los regímenes de HIPOCAS y selección de los cuatro primeros.
6. Definición de las incógnitas con las que se hace la combinación potencial de los cuatro primeros modos.





7. Definición de las funciones a minimizar a partir de 4) y 6) de cada parámetro a calibrar.
8. Cálculo de las incógnitas definidas en 6) de la función a minimizar con el método SCE-UA.
9. Cálculo de los parámetros calibrados con las relaciones definidas en 6).
10. Recomposición de los regímenes con los parámetros calibrados.
11. Generación de las series de  $H_s$  y  $T_m$  calibrados a través de simulaciones de Monte Carlo.
12. Comparación de  $H_s$  y  $T_m$  antes y después de calibrar para determinar los parámetros finales de la calibración.



### 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

#### 3.1. Introducción

Para entender mejor la metodología de calibración empleada, se van a explicar los resultados obtenidos en la calibración de una zona del mar Mediterráneo, la denominada “Valencia”. En la tabla 2.5 se indica el área calibrada de HIPOCAS para la zona de Valencia y las boyas utilizadas para ello. Se van a exponer los resultados de la calibración del régimen medio y régimen medio-alto de  $H_s$  y del régimen medio de  $T_m$ , así como los parámetros finales de la calibración de  $H_s$  y  $T_m$ . En la figura 3.1 se señala la citada zona de calibración, con las boyas con las que se ha realizado dicha calibración.

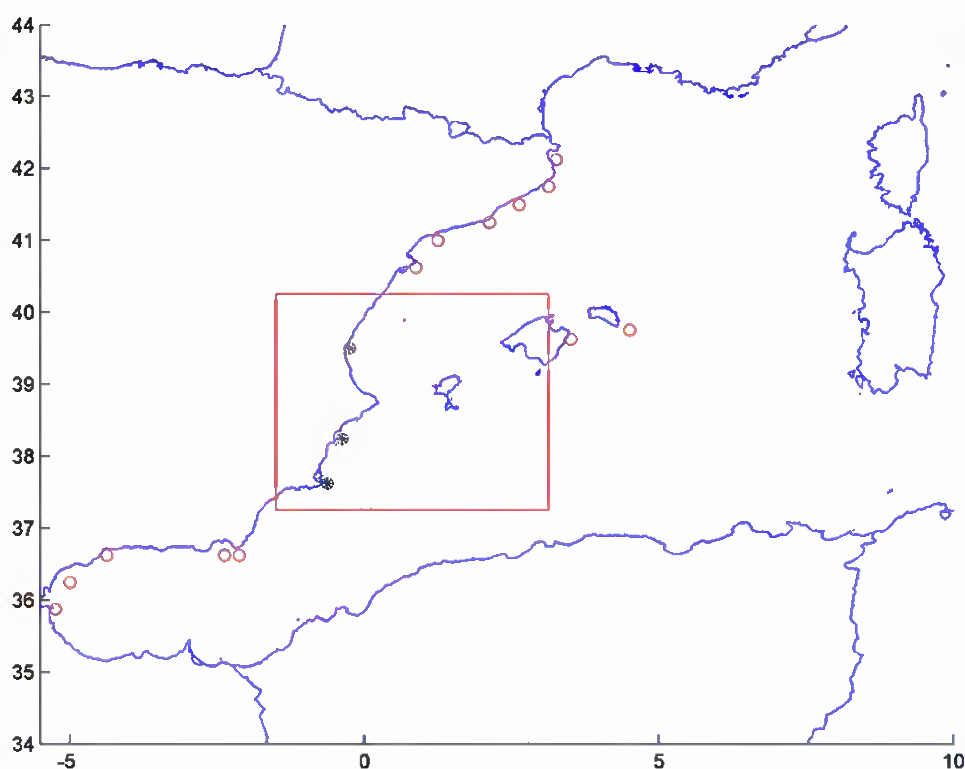


Figura 3.1. Zona de Valencia



### 3.2. Régimen medio de $H_s$

El régimen medio de  $H_s$  se caracteriza por la determinación de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal ajustada entre el 20% y 99.5% de probabilidad acumulada. La descomposición en 4 modos por la técnica EOF de ambos parámetros se muestra en las figuras 3.3 y 3.5, pero previamente a la descomposición en modos, se les resta la media temporal, que se muestra en las figuras 3.2 y 3.4. Nótese que se analizan los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal, no  $\mu^*$  y  $\sigma^*$  (ver anexo A para definiciones). En la figura 3.2 se observa como el oleaje aumenta en las zonas más distantes a la costa, pues la media temporal del parámetro  $\mu$  (media de  $H_s$ ) es mayor.

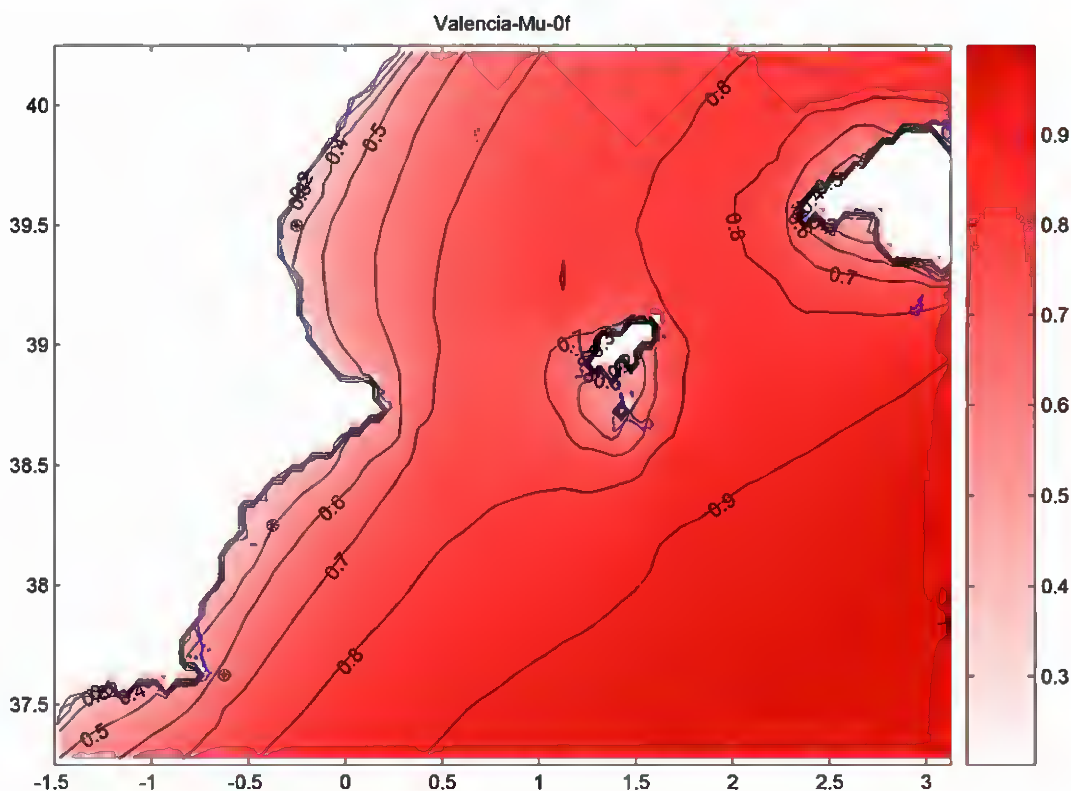


Figura 3.2. Media temporal del parámetro  $\mu$  (en metros)

Las amplitudes temporales del primer modo ( $g_1$ ), tanto de  $\mu$  y  $\sigma$ , en las figuras 3.3 y 3.5, muestran la fluctuación estacional del clima marítimo. En la figura 3.3, el primer modo

espacial ( $f_1$ ) muestra el aumento del oleaje medio al separarse de la costa y el segundo modo espacial ( $f_2$ ) señala la fluctuación norte-sur.

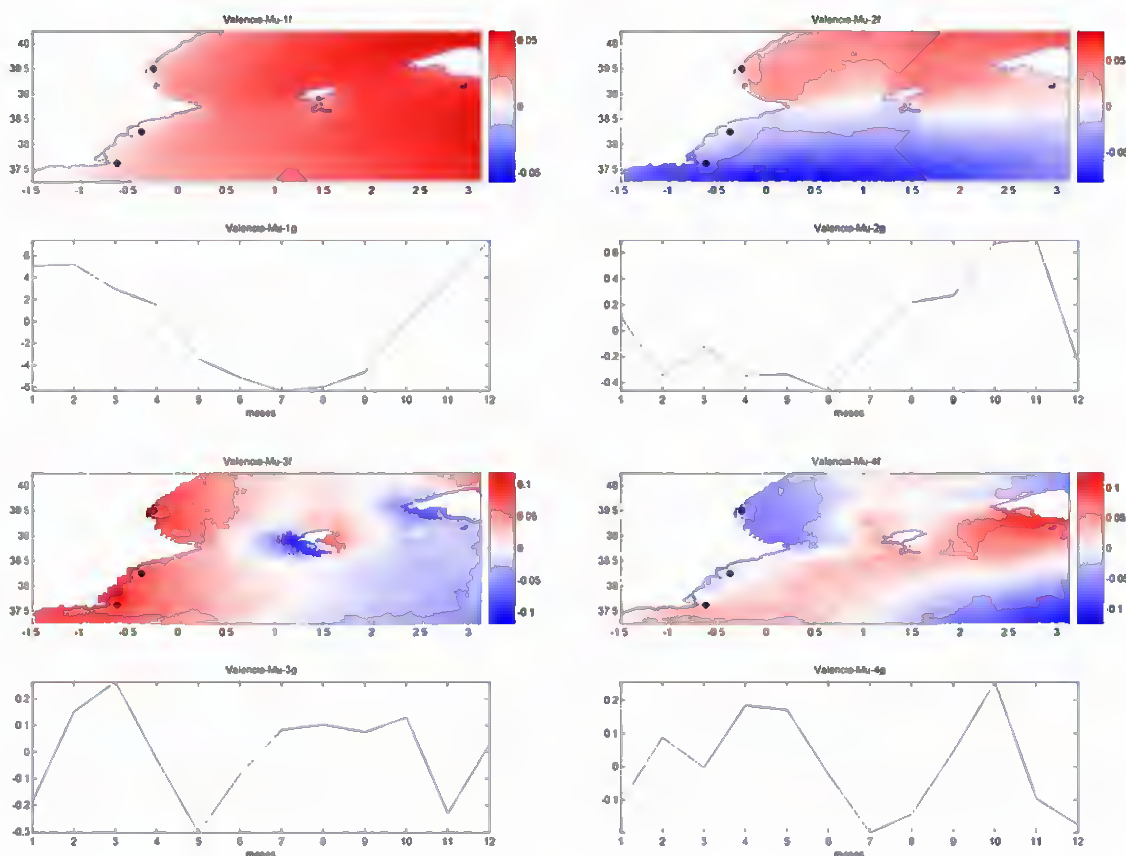


Figura 3.3. Cuatro primeros modos del parámetro  $\mu$

En la figura 3.4 se observa como la variabilidad del oleaje aumenta en las zonas más distantes a la costa, pues la media temporal del parámetro  $\sigma$  (desviación típica de  $H_s$ ) es mayor.

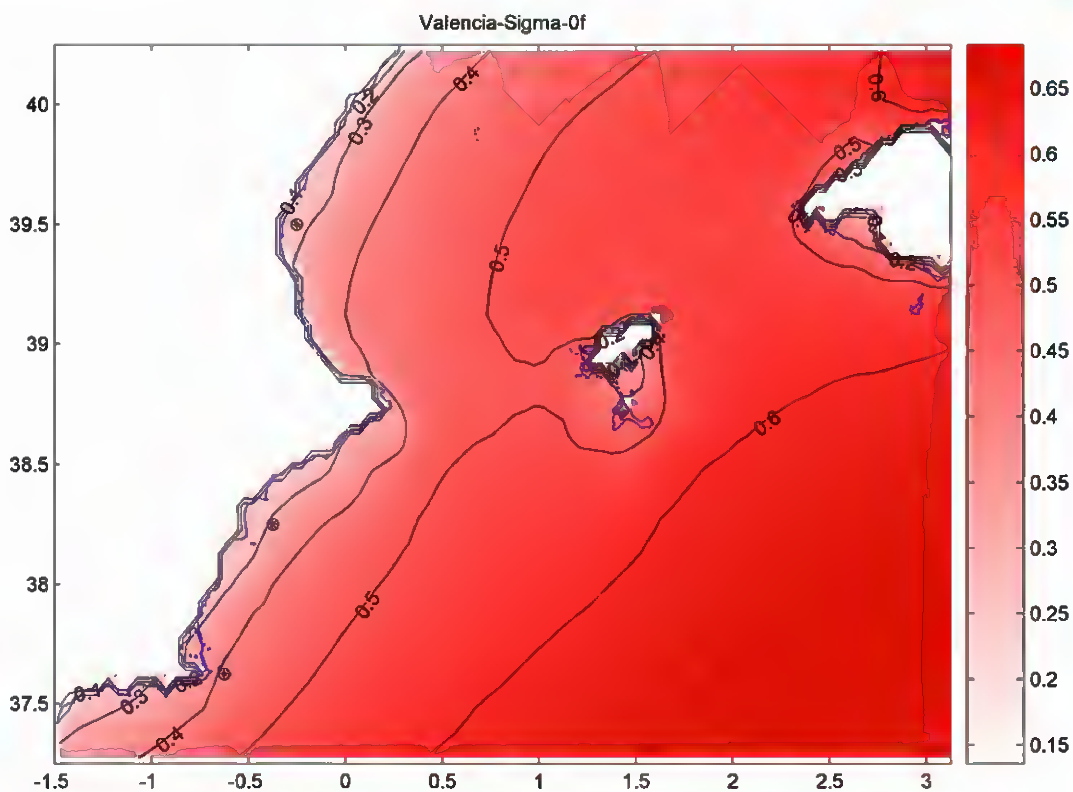


Figura 3.4. Media temporal del parámetro  $\sigma$  (en metros)

En la figura 3.5, el primer modo espacial ( $f_1$ ) muestra el aumento de la variabilidad del oleaje al separarse de la costa y el segundo modo espacial ( $f_2$ ) señala la fluctuación norte-sur.



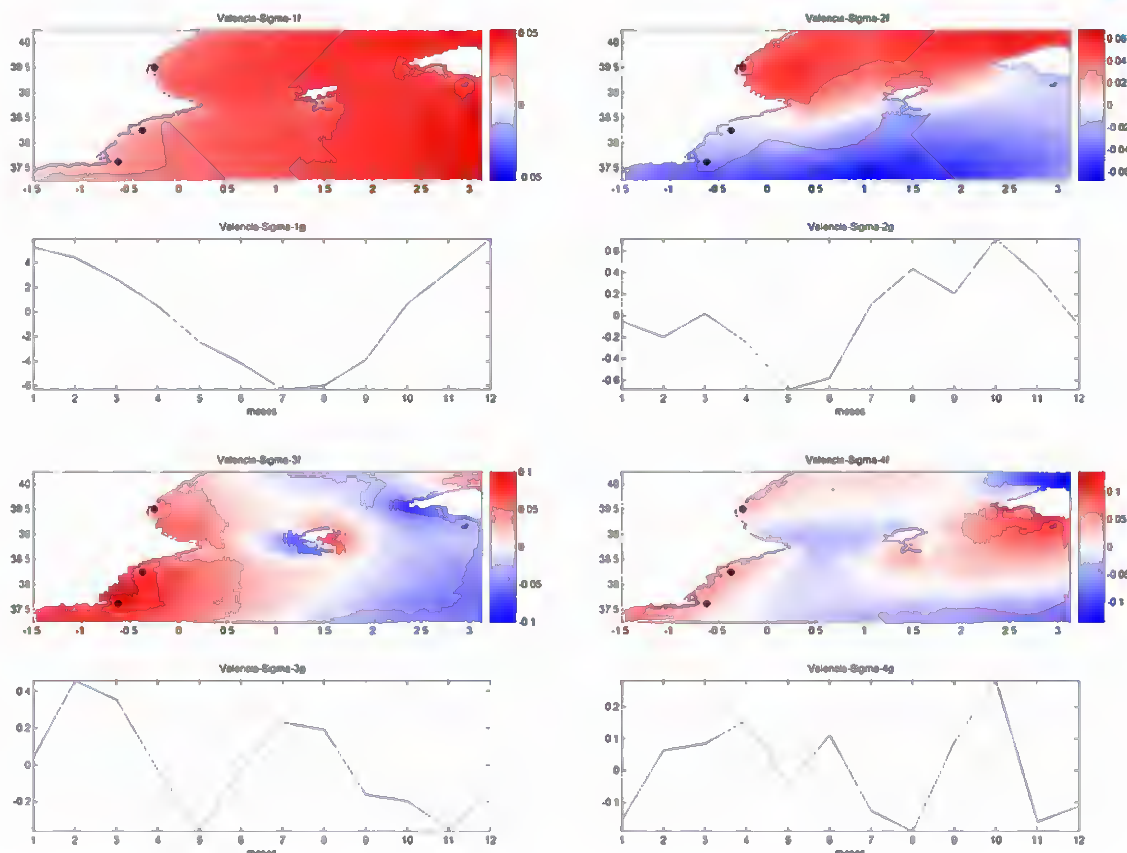


Figura 3.5. Cuatro primeros modos del parámetro  $\sigma$

Una vez determinados los cuatro modos de cada parámetro de la distribución  $\mu$  y  $\sigma$  de HIPOCAS y con los parámetros de la distribución de las boyas se obtienen los parámetros de la calibración que minimizan la función objetivo  $J$  (que es el error definido en el apartado 2.9). En la figura 3.6 se muestra la evolución de  $J$  en la calibración de  $\mu$  y de  $\sigma$  con el método SCE-UA.



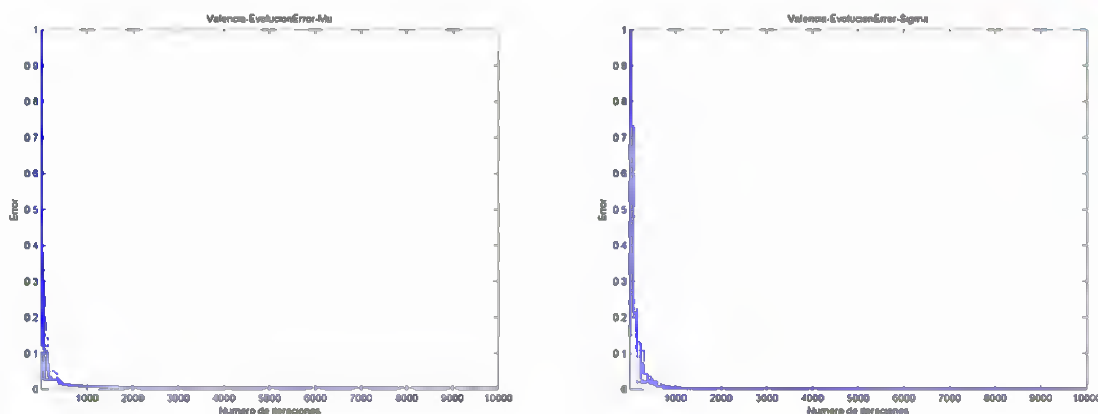


Figura 3.6. Evolución de la función objetivo a minimizar, para  $\mu$  y  $\sigma$

En la figura 3.7 se muestra el valor de los parámetros obtenidos en la calibración de  $\mu$  y  $\sigma$ , es decir  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  definidos en el apartado 2.8, que en la figura son  $\{A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, T\}$  respectivamente.

Valencia-Parametros

Parametros de la calibracion de  $\mu$  y  $\sigma$  (lognormal) con 4 modos:

Parametro  $\mu$  (lognormal):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.00578  
 A1=1.06; A2=1.55; A3=1.50; A4=1.45; A0=1.39  
 B0=0.74; B1=1.16  
 T=0.00

Parametro  $\sigma$  (lognormal):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.00284  
 A1=1.19; A2=1.26; A3=1.20; A4=1.50; A0=1.76  
 B0=2.06; B1=1.03  
 T=0.28

Longitud inicial=-1.500  
 Longitud final=3.125

Latitud inicial=37.250  
 Latitud final=40.250

Figura 3.7. Parámetros obtenidos en la calibración de  $\mu$  y  $\sigma$





Una vez obtenidos los parámetros de la calibración, se determinan los parámetros de la distribución Lognormal del régimen medio de  $H_s$  calibrados. En la figura 3.8 se muestran estos parámetros ( $\mu$  y  $\sigma$ ) antes y después de calibrar, comparándolos con los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas; sólo se comparan los de las posiciones de las boyas, y la comparación se hace relativizándola con el valor medio anual de las boyas. Se observa en la figura como se aproximan, tras la calibración, a la bisectriz; esto muestra la semejanza entre  $\mu$  y  $\sigma$  de las boyas y de HIPOCAS calibrado en las posiciones de las boyas. Se pasa de tener una correlación de los puntos con la bisectriz del 51% al 93% en  $\mu$  y del 62% al 100% en  $\sigma$ , haciéndose muy apreciable la mejora conseguida.

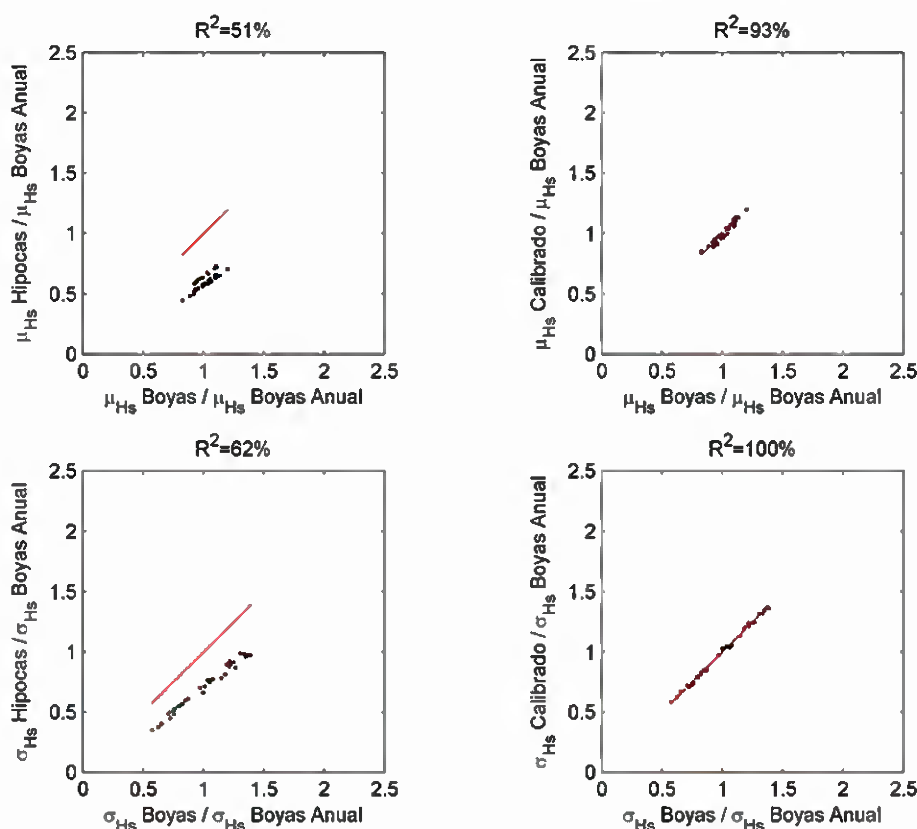


Figura 3.8. Comparación relativa entre  $\mu$  y  $\sigma$  antes y después de calibrar HIPOCAS, con los de las boyas





También se puede constatar la mejora producida comparando los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  a lo largo del tiempo en las posiciones de las boyas. En las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se comprueba como, tras la calibración, en todas las boyas de la zona de la calibración, tanto  $\mu$  como  $\sigma$  de HIPOCAS calibrado reproduce casi perfectamente los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas.

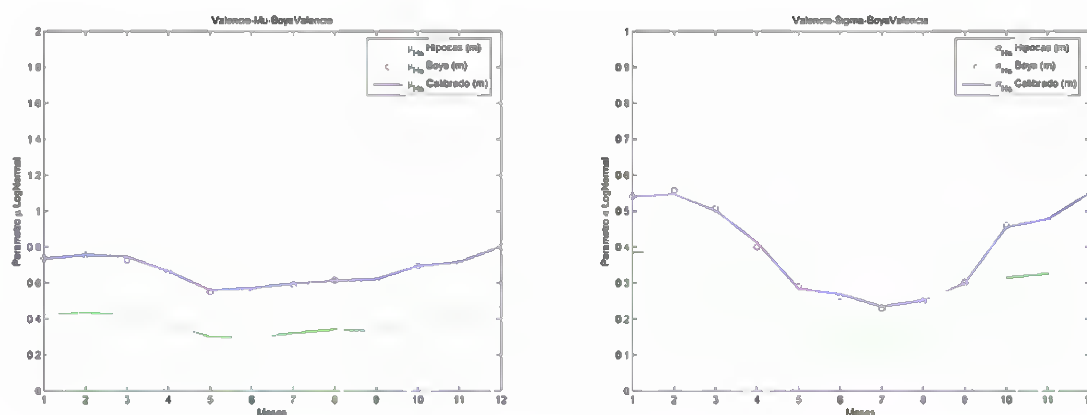


Figura 3.9. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Valencia

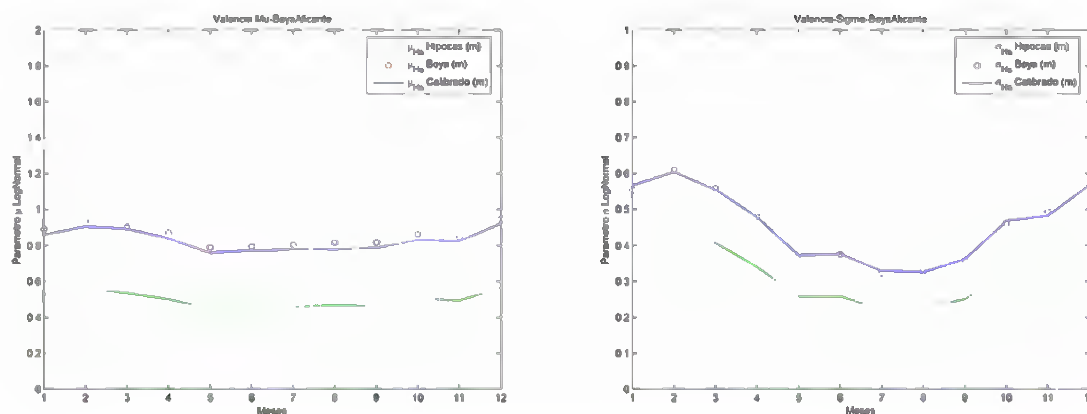


Figura 3.10. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Alicante



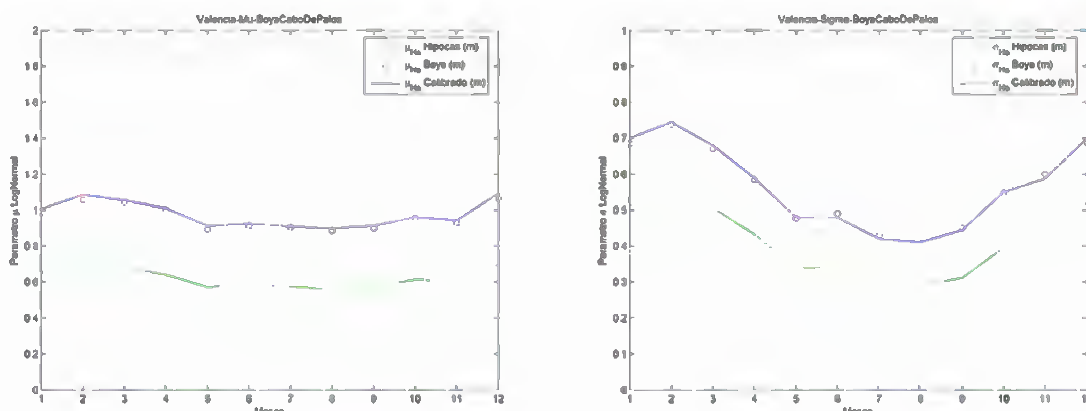


Figura 3.11. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Cabo de Palos

El resto de figuras que aparecen en este apartado muestran la distribución espacial de ambos parámetros ( $\mu$  y  $\sigma$ ), antes y después de calibrarse, así como los valores utilizados de las boyas corregidas para la calibración. Se muestra la distribución espacial de la media temporal de ambos parámetros en las figuras 3.12 y 3.15; así como las distribuciones espaciales mes a mes, en las figuras 3.13 y 3.14 de  $\mu$  y en las figuras 3.16 y 3.17 de  $\sigma$ . Así se tienen los regímenes medios mensuales de todos los puntos de la zona definidos con los dos parámetros de la distribución  $\mu$  y  $\sigma$ , para cada posición y para cada mes.

En las figuras 3.18 y 3.19 se representa  $\mu$ , mes a mes, a lo largo de la línea de costa y en las figuras 3.20 y 3.21 se muestra  $\sigma$ . La línea de costa se compone de tres tramos, la costa peninsular, la costa de Ibiza y la costa de Mallorca que está en el interior de la zona de calibración.





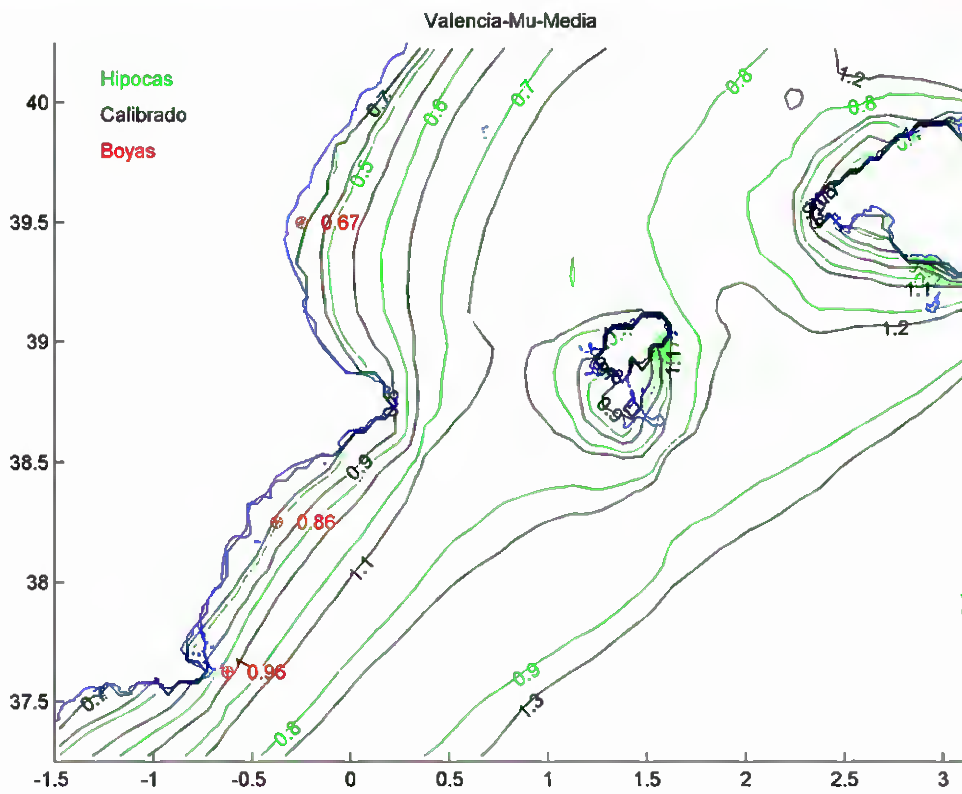


Figura 3.12. Distribución espacial de la media temporal de  $\mu$



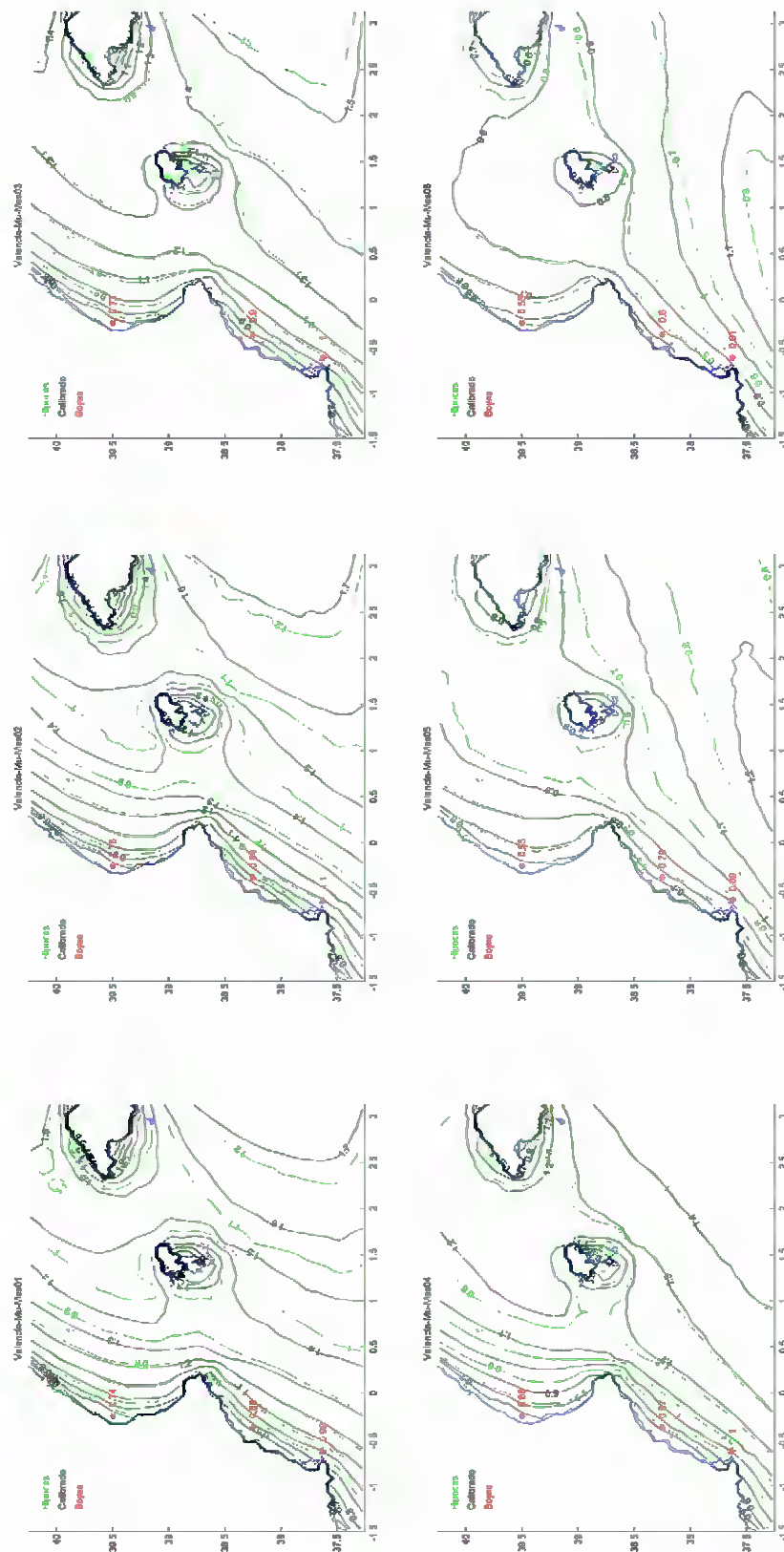


Figura 3.13. Distribución espacial de  $\mu$  para los seis primeros meses del año



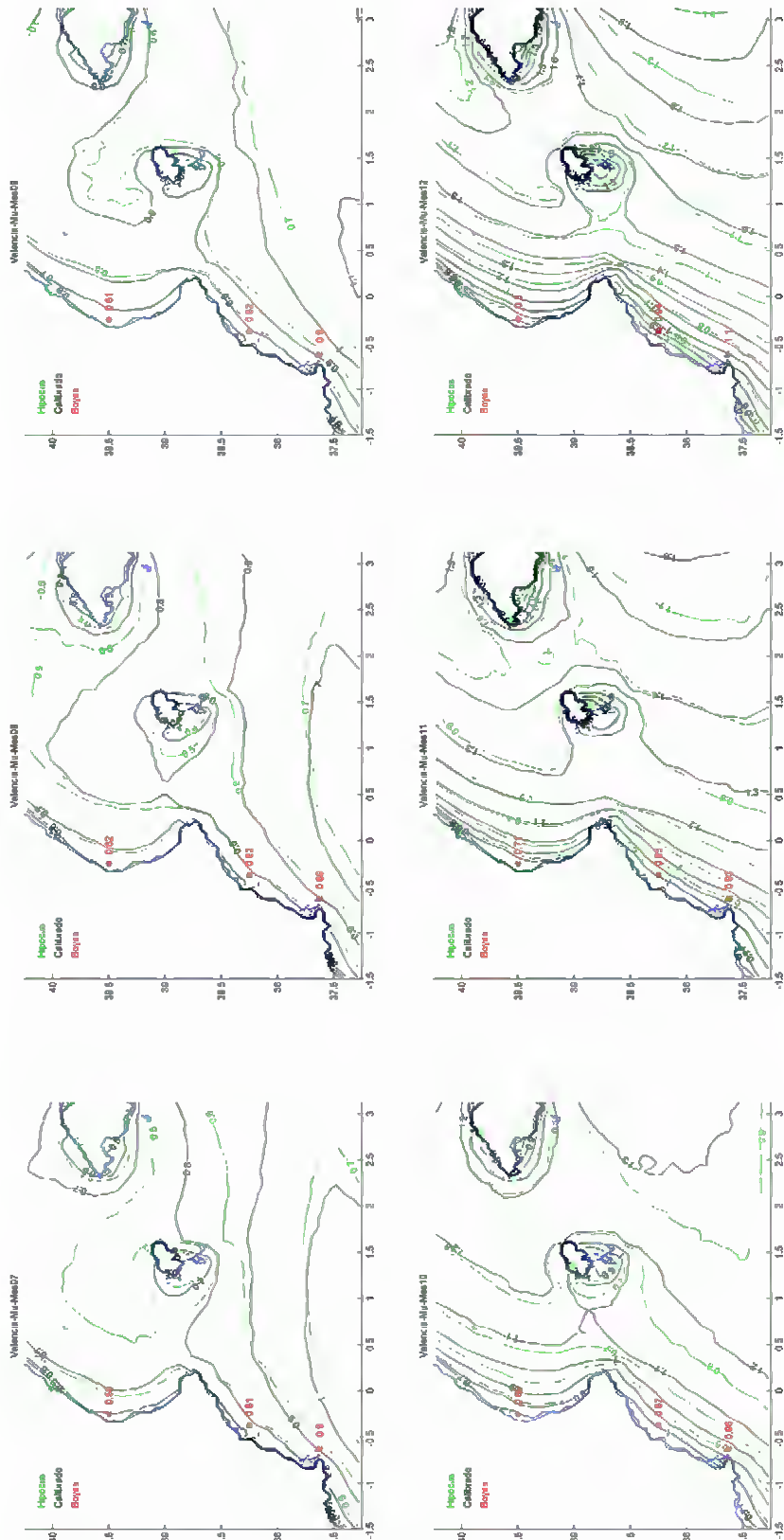


Figura 3.14. Distribución espacial de  $\mu$  para los seis últimos meses del año



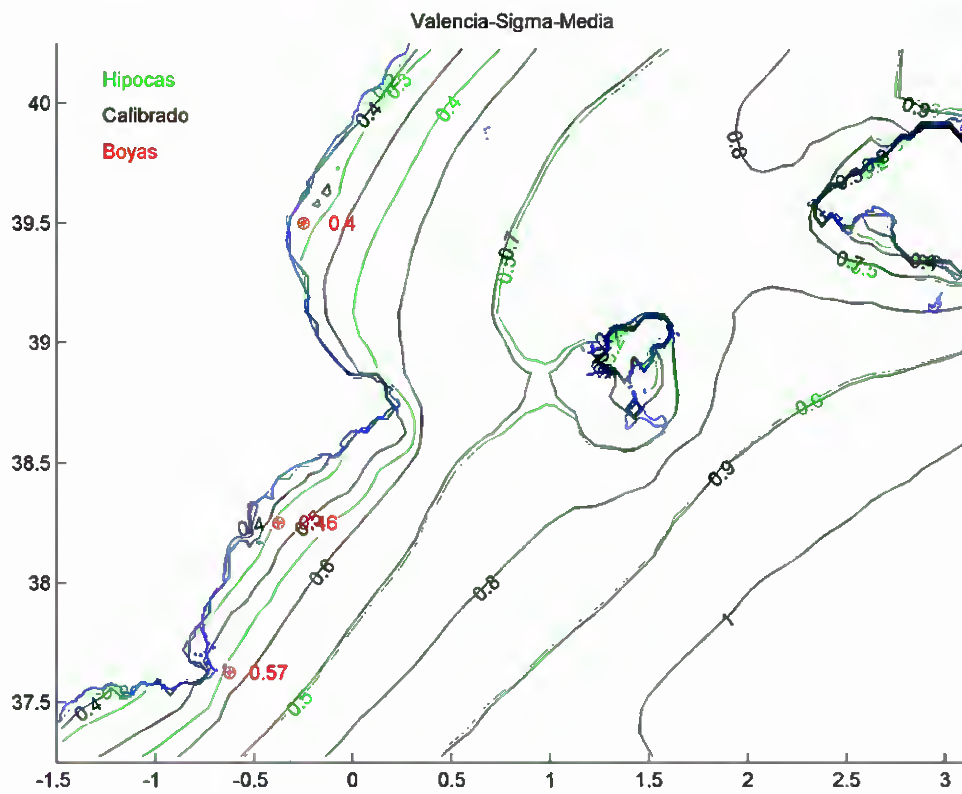


Figura 3.15. Distribución espacial de la media temporal de  $\sigma$



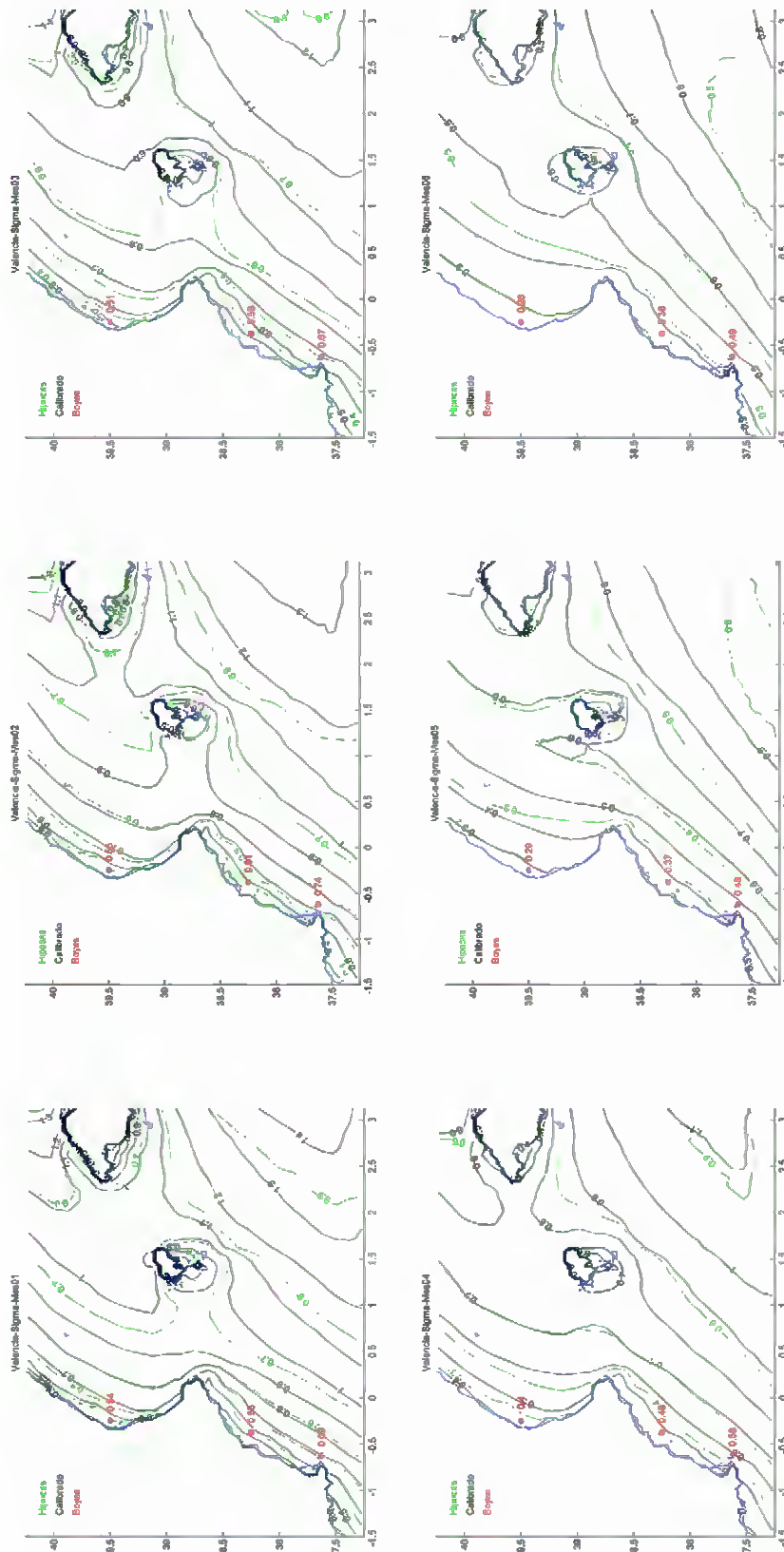


Figura 3.16. Distribución espacial de  $\sigma$  para los seis primeros meses del año



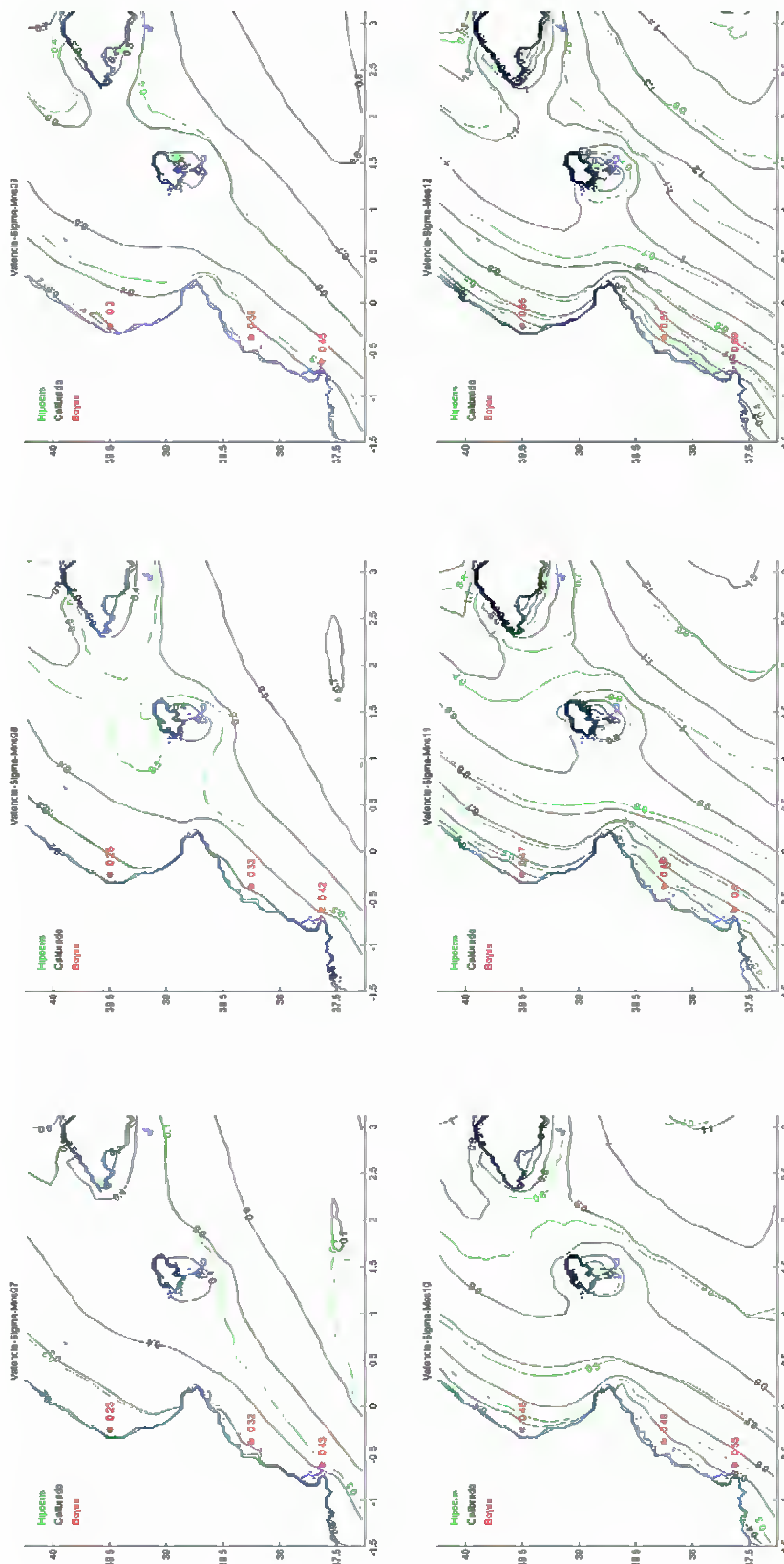


Figura 3.17. Distribución espacial de  $\sigma$  para los seis últimos meses del año



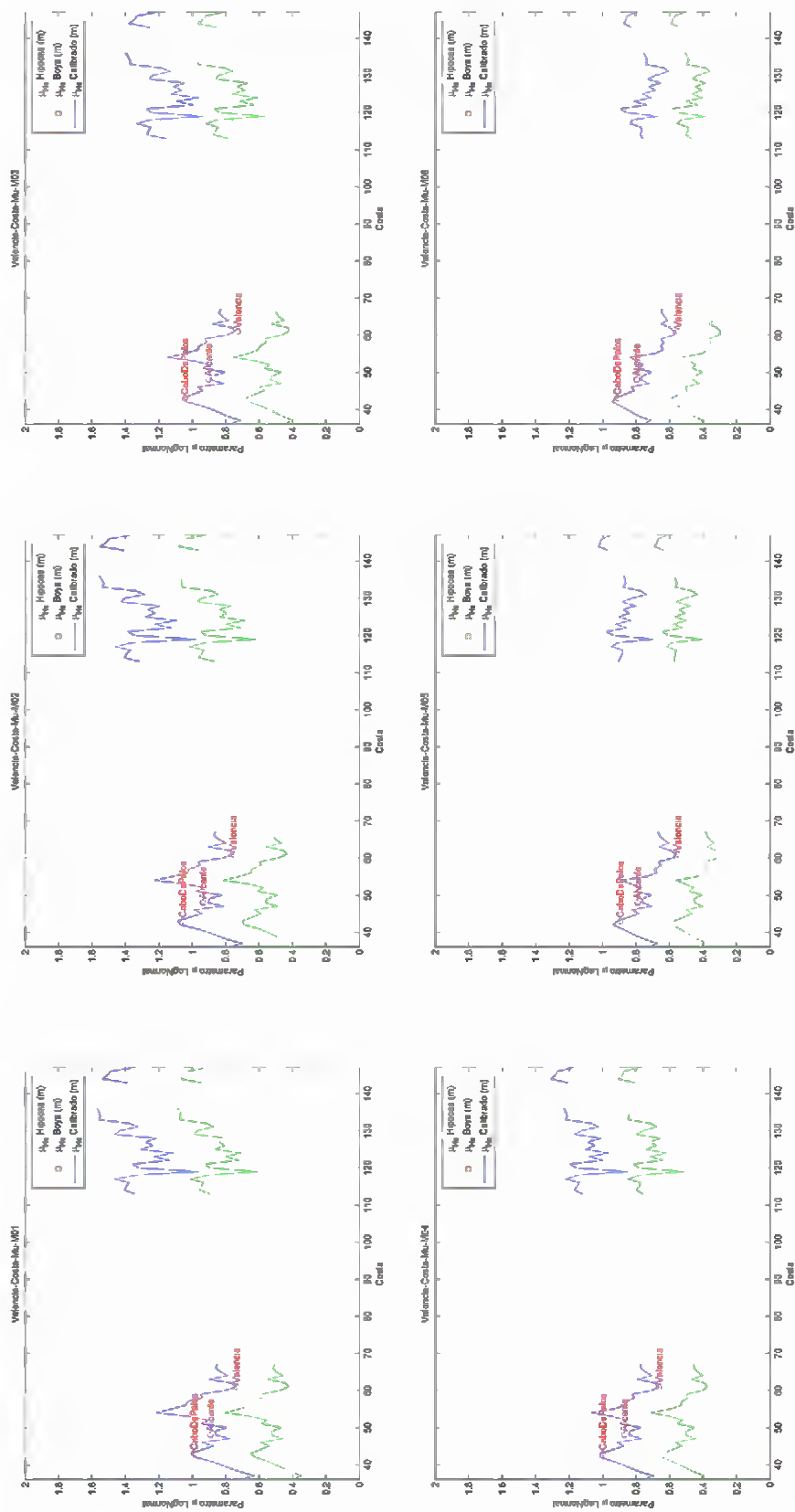


Figura 3.18. Distribución de  $\mu$  en la costa para los seis primeros meses del año





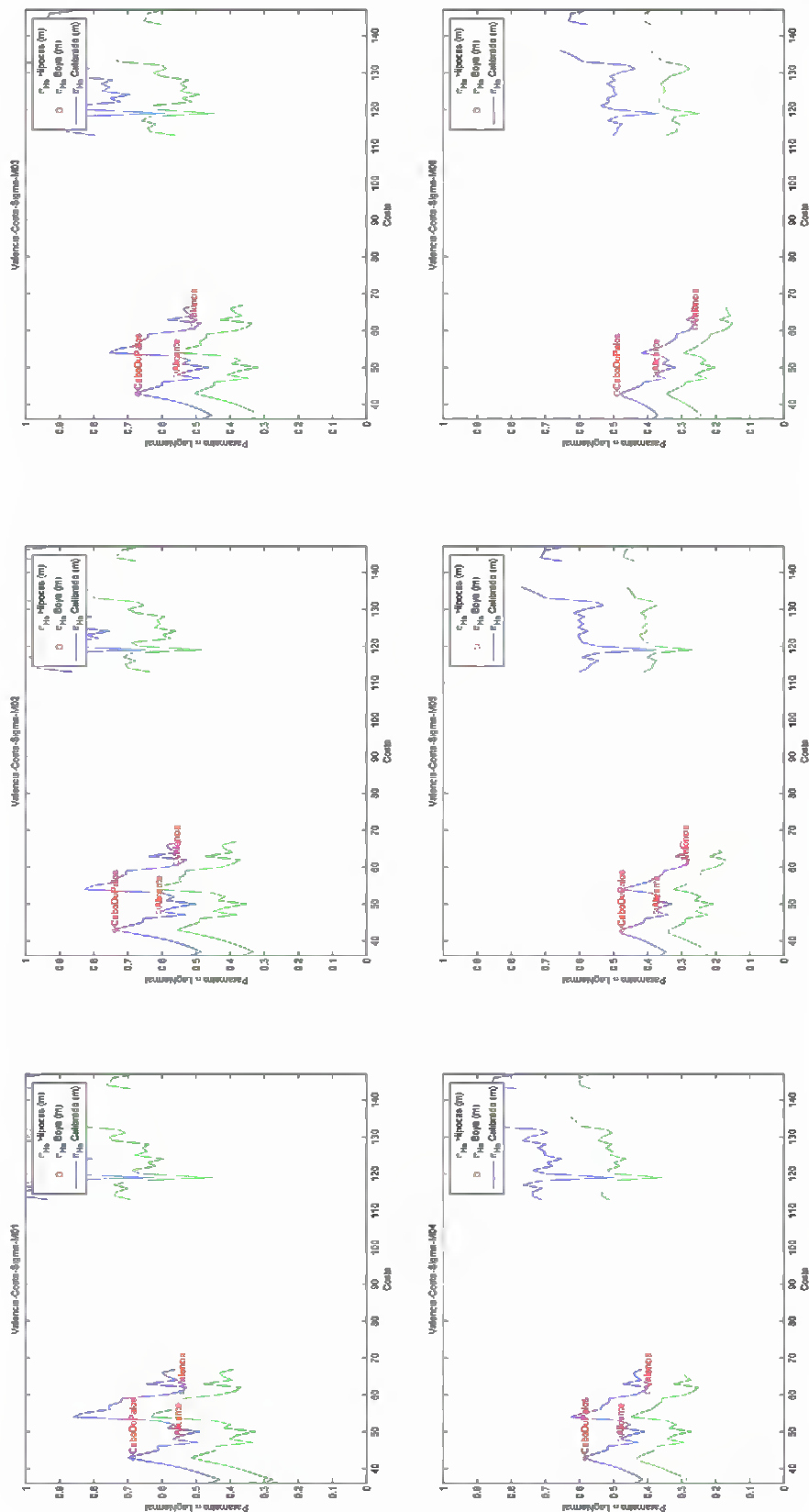


Figura 3.20. Distribución de  $\sigma$  en la costa para los seis primeros meses del año





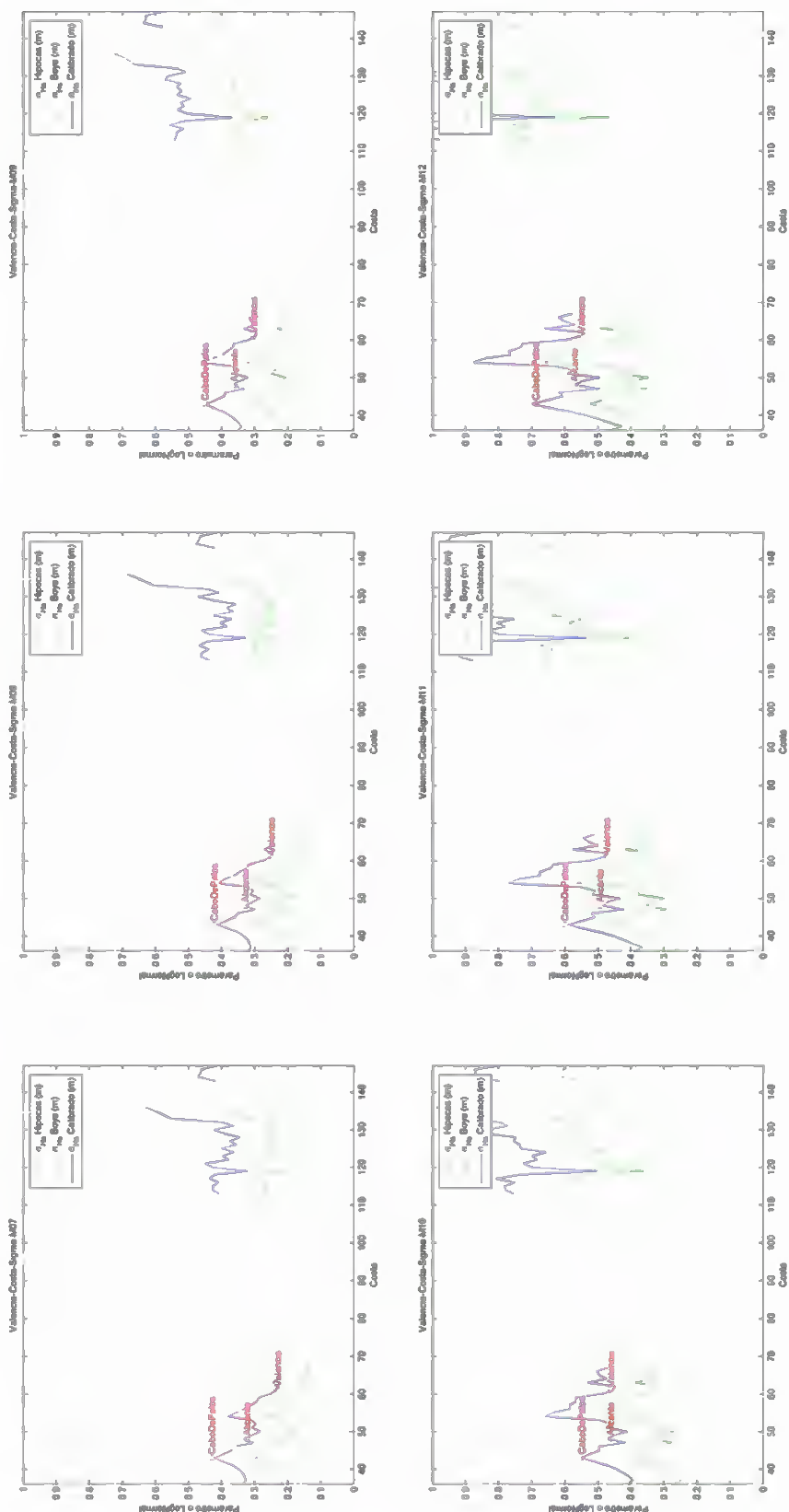


Figura 3.21. Distribución de  $\sigma$  en la costa para los seis últimos meses del año





### 3.3. RÉGIMEN MEDIO-ALTO DE $H_s$

El régimen medio-alto de  $H_s$  se caracteriza por la determinación de los parámetros  $\lambda$  y  $\delta$  de la distribución Gumbel de máximos ajustada entre el 99.5% y 100% de probabilidad acumulada, pero realmente se calibran  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  (ver apartado 2.6). La descomposición en 4 modos por la técnica EOF de ambos parámetros se muestra en las figuras 3.23 y 3.25, pero previamente a la descomposición en modos, se les resta la media temporal, que se muestra en las figuras 3.22 y 3.24. En la figura 3.22 se observa como los oleajes mayores aumentan en las zonas más distantes a la costa, pues la media temporal del parámetro  $H_{s,99.5\%}$  es mayor.

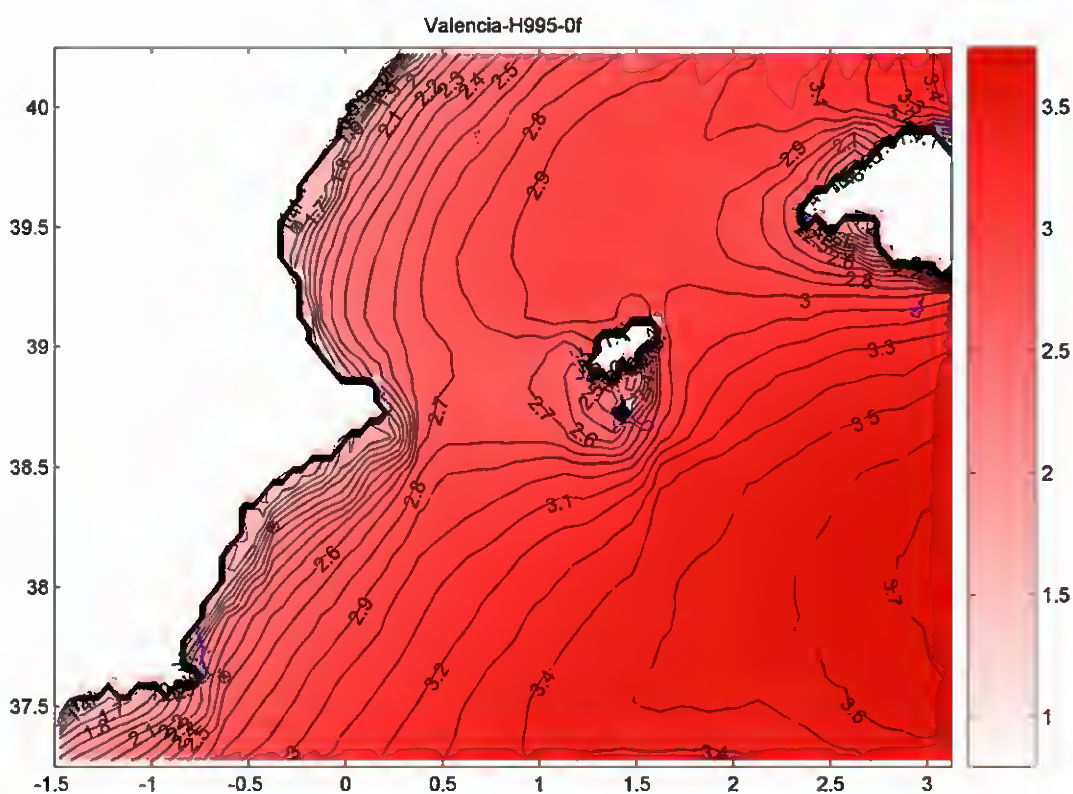


Figura 3.22. Media temporal del parámetro  $H_{s,99.5\%}$  (en metros)



En la figura 3.23, el primer modo espacial ( $f_1$ ) muestra el aumento de los oleajes mayores al separarse de la costa y la amplitud temporal del primer modo ( $g_1$ ) muestra la fluctuación estacional de estos oleajes mayores.

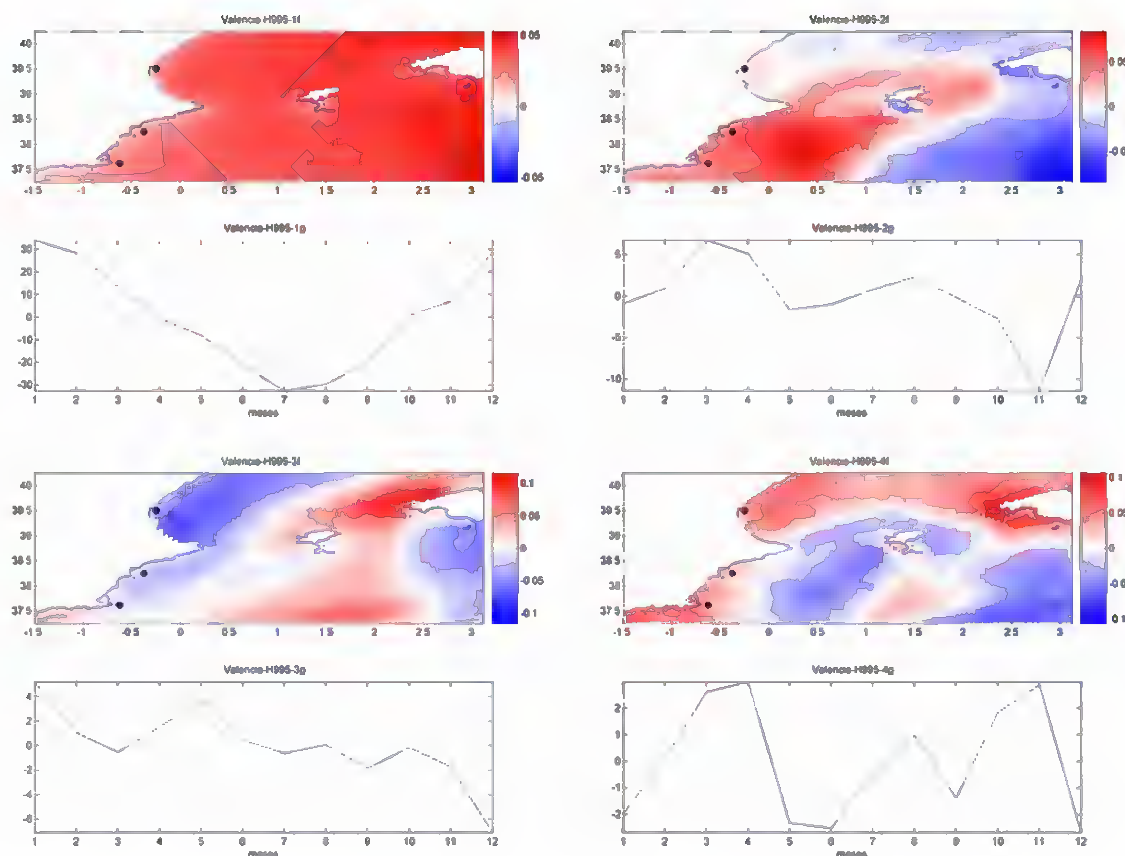


Figura 3.23. Cuatro primeros modos del parámetro  $H_{s,99.5\%}$

En la figura 3.24 se observa como la variabilidad del oleaje disminuye en las zonas más próximas a la costa, sobre todo en las costas que ofrecen abrigo de los oleajes procedentes del norte, pues la media temporal del parámetro  $\delta$  es menor ( $\delta^2$  es proporcional a la varianza).

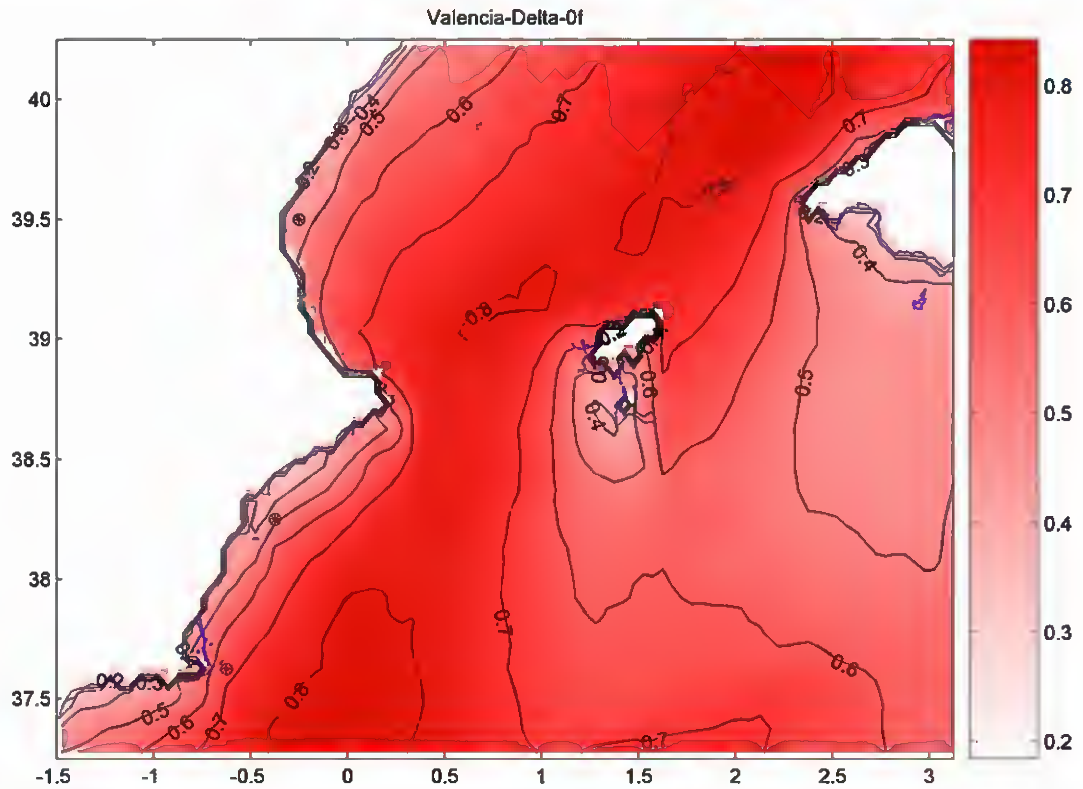


Figura 3.24. Media temporal del parámetro  $\delta$

En la figura 3.25, el primer modo espacial ( $f_1$ ) muestra el aumento de la variabilidad de los oleajes mayores al separarse de la costa y la amplitud temporal del primer modo ( $g_1$ ) no muestra la una fluctuación estacional, sino más bien un aumento en los meses de noviembre y diciembre.



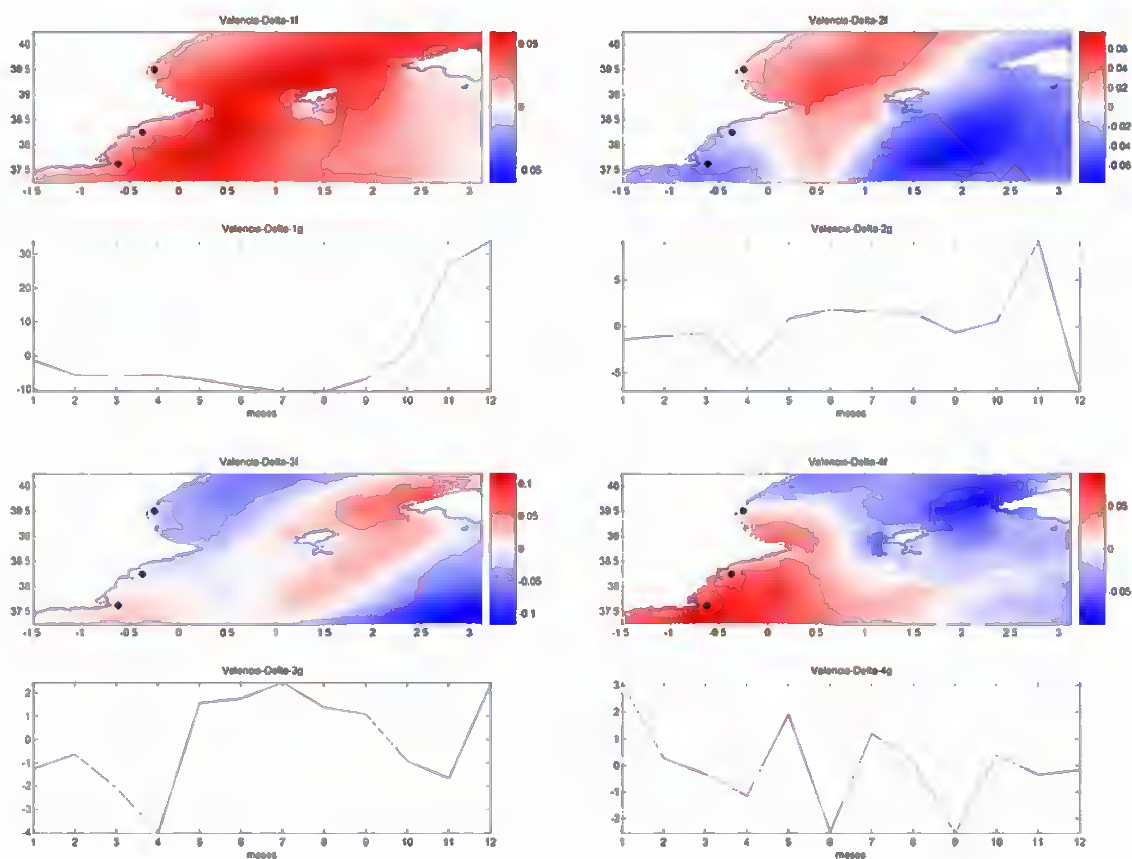


Figura 3.25. Cuatro primeros modos del parámetro  $\delta$

Una vez determinados los cuatro modos de cada parámetro de la distribución  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  de HIPOCAS y con los parámetros de la distribución de las boyas se obtienen los parámetros de la calibración que minimizan la función objetivo  $J$  (que es el error definido en el apartado 2.9). En la figura 3.26 se muestra la evolución de  $J$  en la calibración de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  con el método SCE-UA.



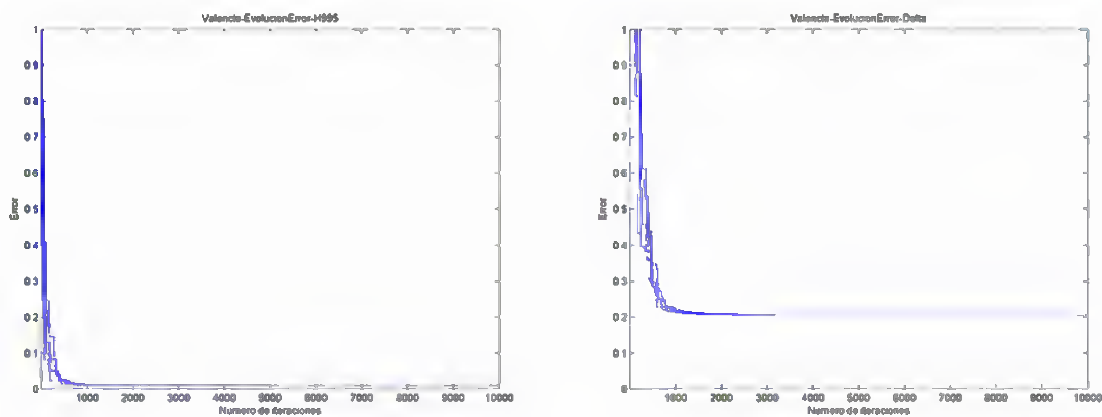


Figura 3.26. Evolución de la función objetivo a minimizar, para  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$

En la figura 3.27 se muestra el valor de los parámetros obtenidos en la calibración de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ , es decir  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  definidos en el apartado 2.8, que en la figura son {A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, T} respectivamente.





Valencia-Parametros

Parametros de la calibracion de  $H_{99.5}$  y  $\delta$  (Gumbel Maximos) con 4 modos:

Parametro  $H_{99.5}$  (Gumbel Maximos):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:2  
 Error acumulado de la calibracion:0.0101  
 A1=0.68; A2=0.91; A3=1.36; A4=1.49; A0=1.67  
 B0=0.79; B1=1.16  
 T=0.00

Parametro  $\delta$  (Gumbel Maximos):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:2  
 Error acumulado de la calibracion:0.206  
 A1=1.15; A2=0.79; A3=0.73; A4=0.87; A0=0.89  
 B0=0.86; B1=0.90  
 T=0.00

Longitud inicial=-1.500  
 Longitud final=3.125

Latitud inicial=37.250  
 Latitud final=40.250

Figura 3.27. Parámetros obtenidos en la calibración de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$

Una vez obtenidos los parámetros de la calibración, se determinan los parámetros de la distribución Gumbel de máximos del régimen medio-alto de  $H_s$  calibrados. En la figura 3.28 se muestran estos parámetros ( $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ ) antes y después de calibrar, comparándolos con los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas; sólo se comparan los de las posiciones de las boyas, y la comparación se hace relativizándola con el valor medio anual de las boyas. Se observa en la figura como se aproximan, tras la calibración, a la bisectriz; esto muestra la semejanza entre  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  de las boyas y de HIPOCAS calibrado en las posiciones de las boyas. Se pasa de tener una correlación de los puntos con la bisectriz del 60% al 98% en  $H_{s,99.5\%}$  y del 94% al 96% en  $\delta$ , haciéndose muy apreciable la mejora conseguida, sobretodo en  $H_{s,99.5\%}$ .





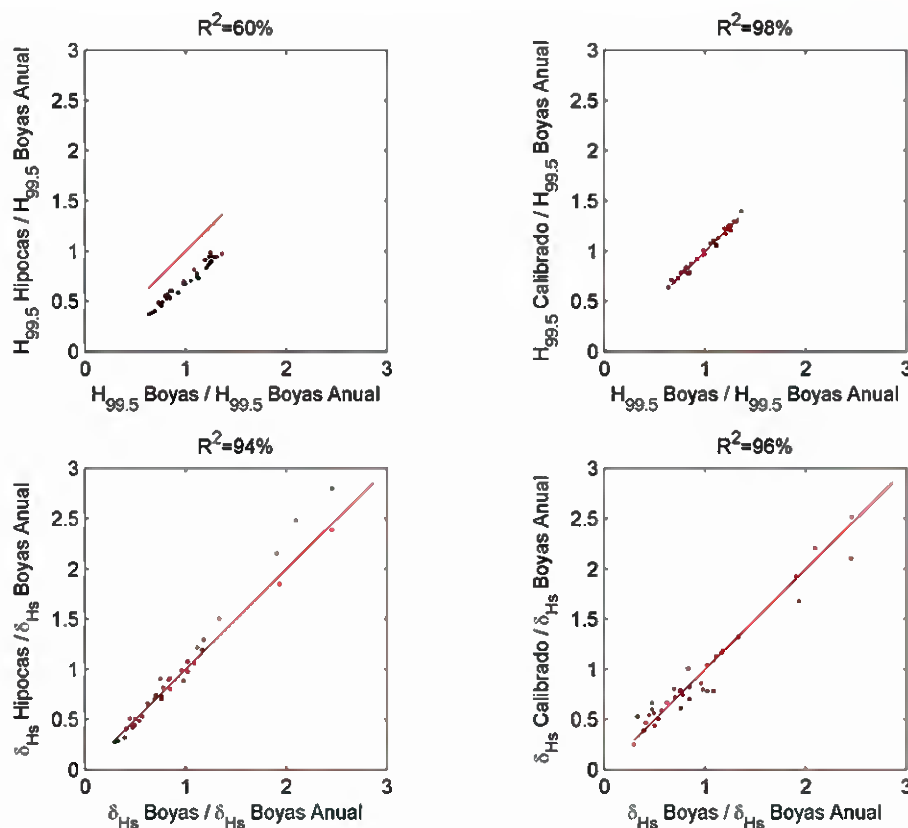


Figura 3.28. Comparación relativa entre  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  antes y después de calibrar HIPOCAS, con los de las boyas

También se puede constatar la mejora producida comparando los parámetros  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  a lo largo del tiempo en las posiciones de las boyas. En las figuras 3.29, 3.30 y 3.31 se comprueba como, tras la calibración, en todas las boyas de la zona de la calibración,  $H_{s,99.5\%}$  de HIPOCAS calibrado reproduce casi perfectamente los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas; para  $\delta$  la mejoría no es tan notable, pues antes de calibrar ya había un buen ajuste.  $\delta$  en algunos puntos empeora su ajuste tras la calibración, pero globalmente mejora.



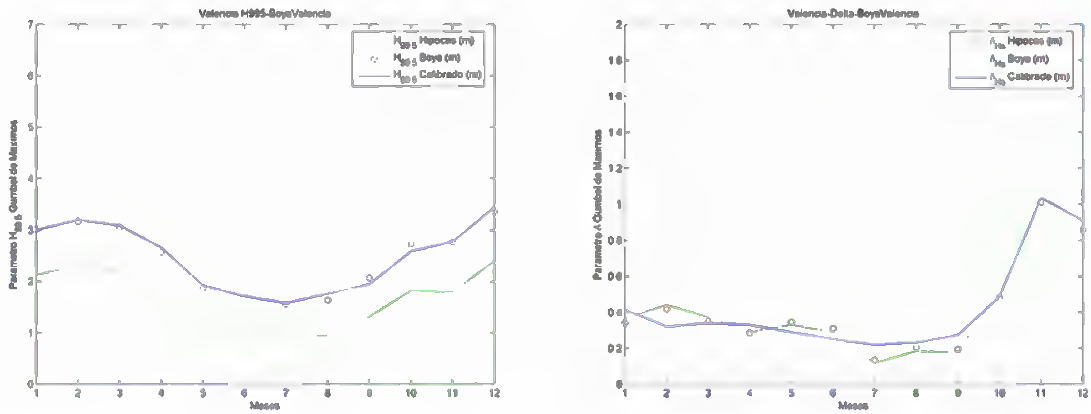


Figura 3.29. Evolución temporal de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  en Valencia

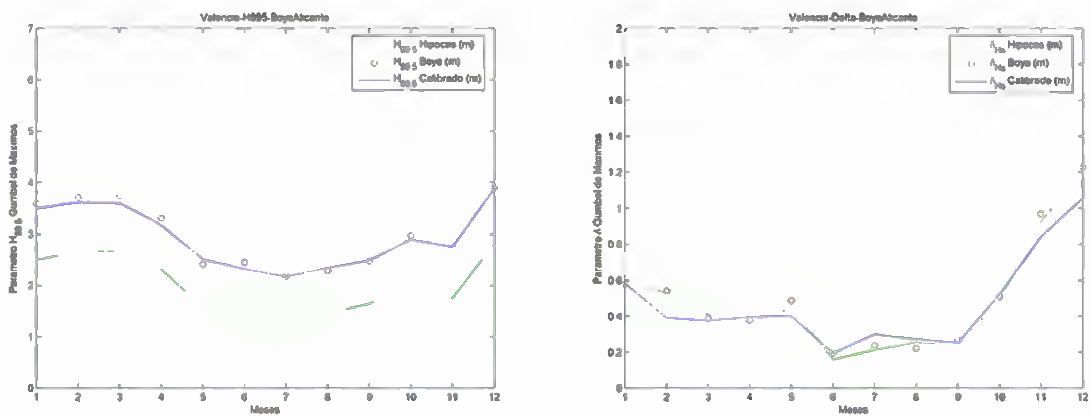


Figura 3.30. Evolución temporal de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  en Alicante



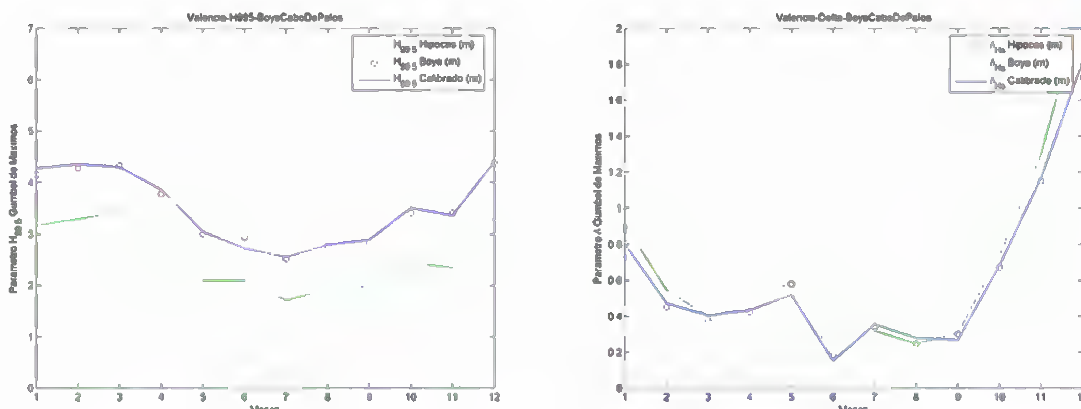


Figura 3.31. Evolución temporal de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$  en Cabo de Palos

El resto de figuras que aparecen en este apartado muestran la distribución espacial de ambos parámetros ( $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ ) antes y después de calibrarse, así como los valores utilizados de las boyas corregidas para la calibración. Se muestra la distribución espacial de la media temporal de ambos parámetros en las figuras 3.32 y 3.35; así como las distribuciones espaciales mes a mes, en las figuras 3.33 y 3.34 de  $H_{s,99.5\%}$  y en las figuras 3.36 y 3.37 de  $\delta$ . Así se tienen los regímenes medio-altos mensuales de todos los puntos de la zona definidos a partir de los dos parámetros calibrados ( $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ ) para cada posición y para cada mes.

A partir de  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ , se puede definir la distribución Gumbel de máximos, determinando  $\lambda$  y  $\delta$ . En las figuras 3.38 y 3.39 se representa  $H_{s,99.5\%}$ , mes a mes, a lo largo de la línea de costa, en las figuras 3.40 y 3.41 se muestra  $\delta$  y en las figuras 3.42 y 3.43 se muestra  $\lambda$ . La línea de costa se compone de tres tramos, la costa peninsular, la costa de Ibiza y la costa de Mallorca que está en el interior de la zona de calibración.

Se comprueba que los mejores ajustes se producen en  $H_{s,99.5\%}$ , pero en  $\delta$  y en  $\lambda$  también son buenos. Nótese que la mejoría que se produce en  $\lambda$ , aunque se haya calibrado  $H_{s,99.5\%}$  y  $\delta$ , verifica la calibración realizada.



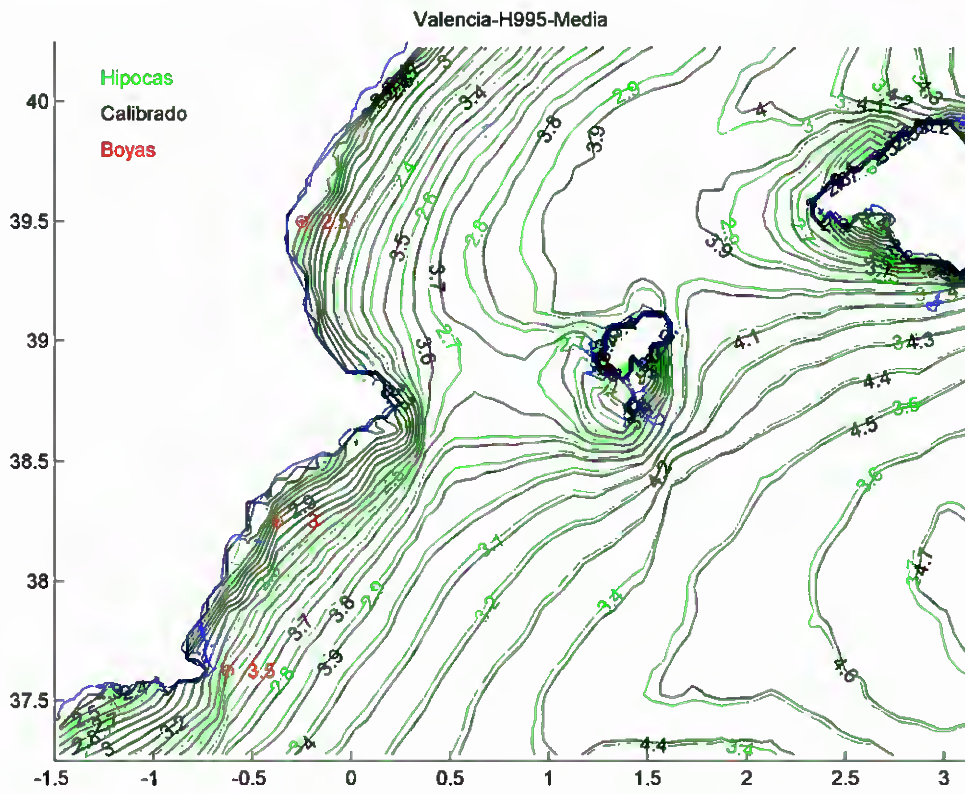


Figura 3.32. Distribución espacial de la media temporal de  $H_{s,99.5\%}$



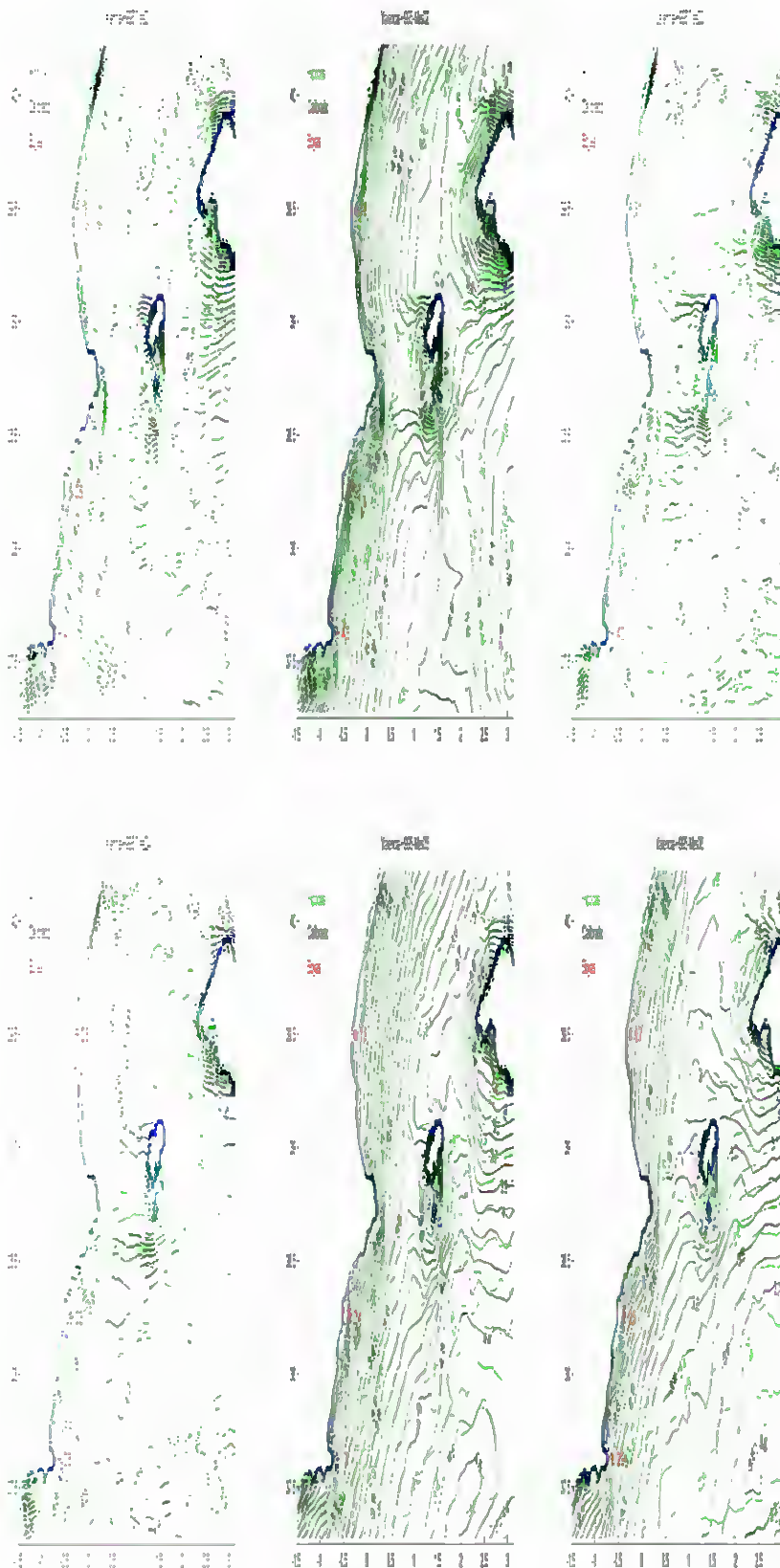




Figura 3.33. Distribución espacial de  $H_{s,99,5\%}$  para los primeros seis meses del año



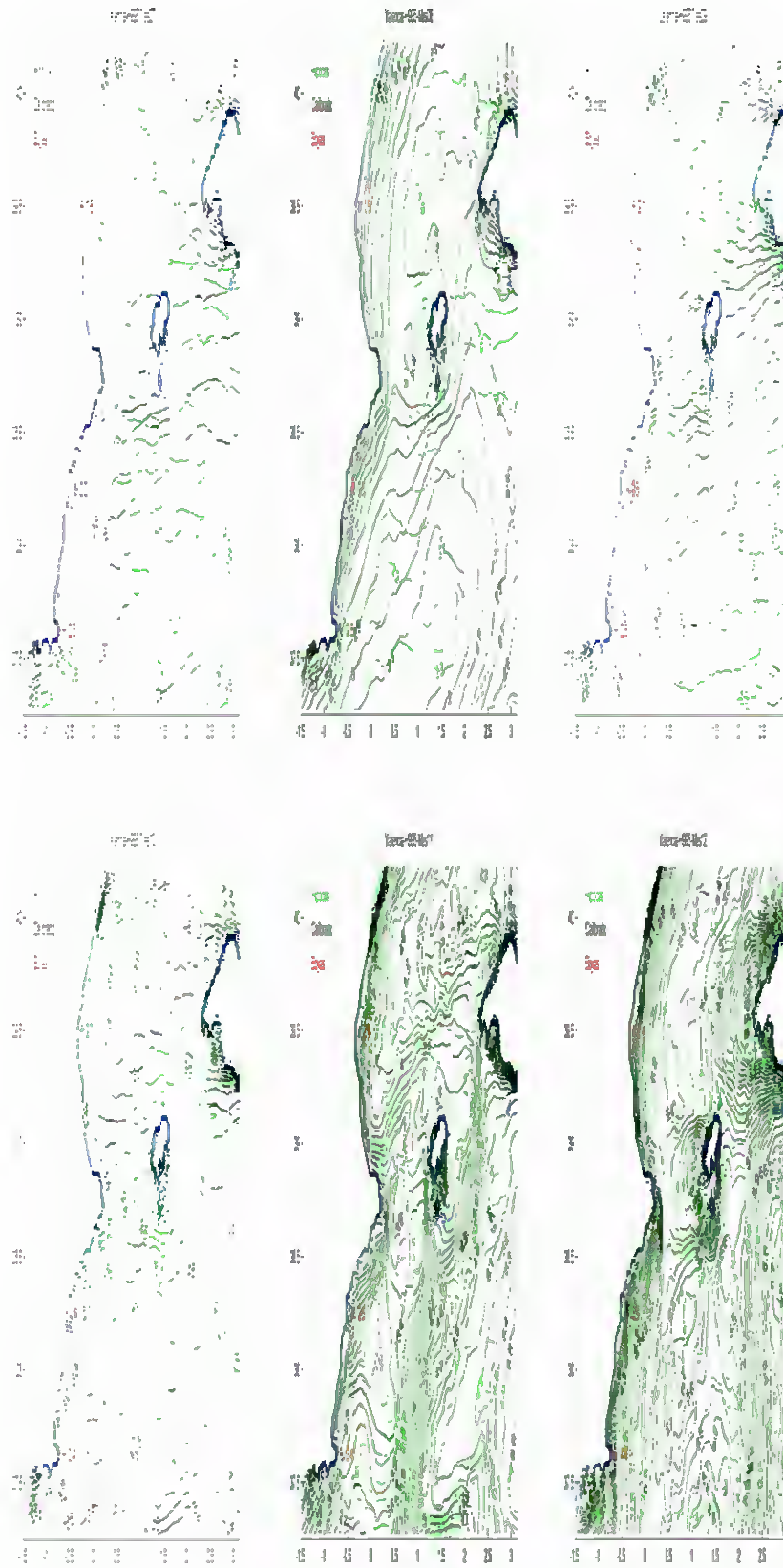
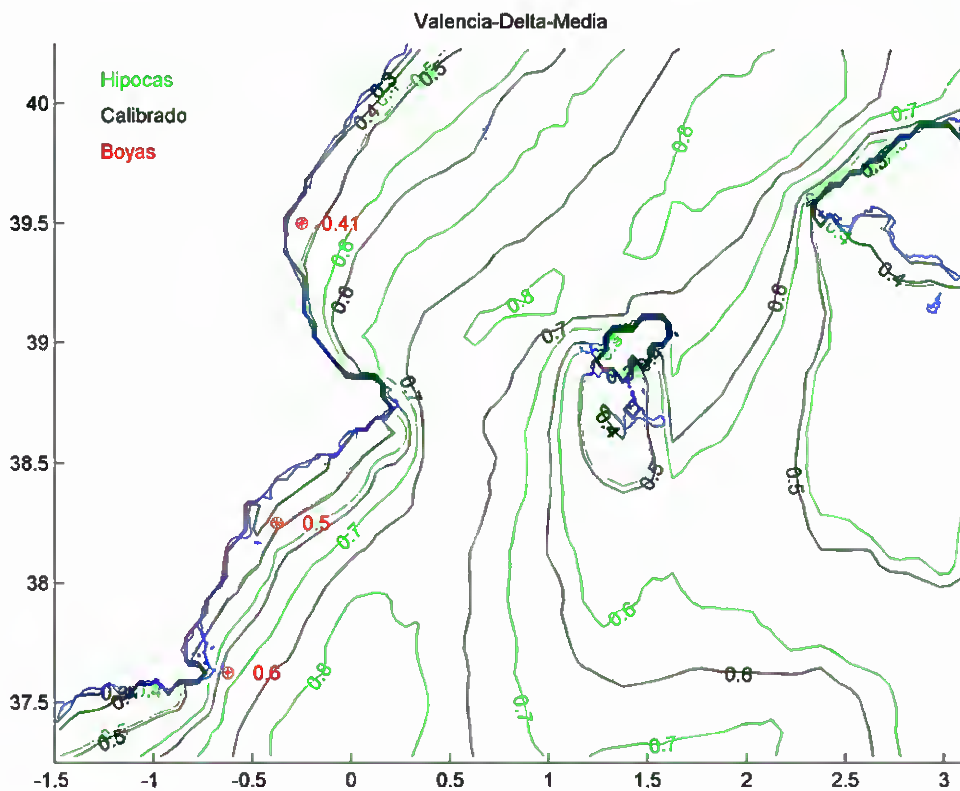




Figura 3.34. Distribución espacial de  $H_{9,99,5\%}$  para los últimos seis meses del año





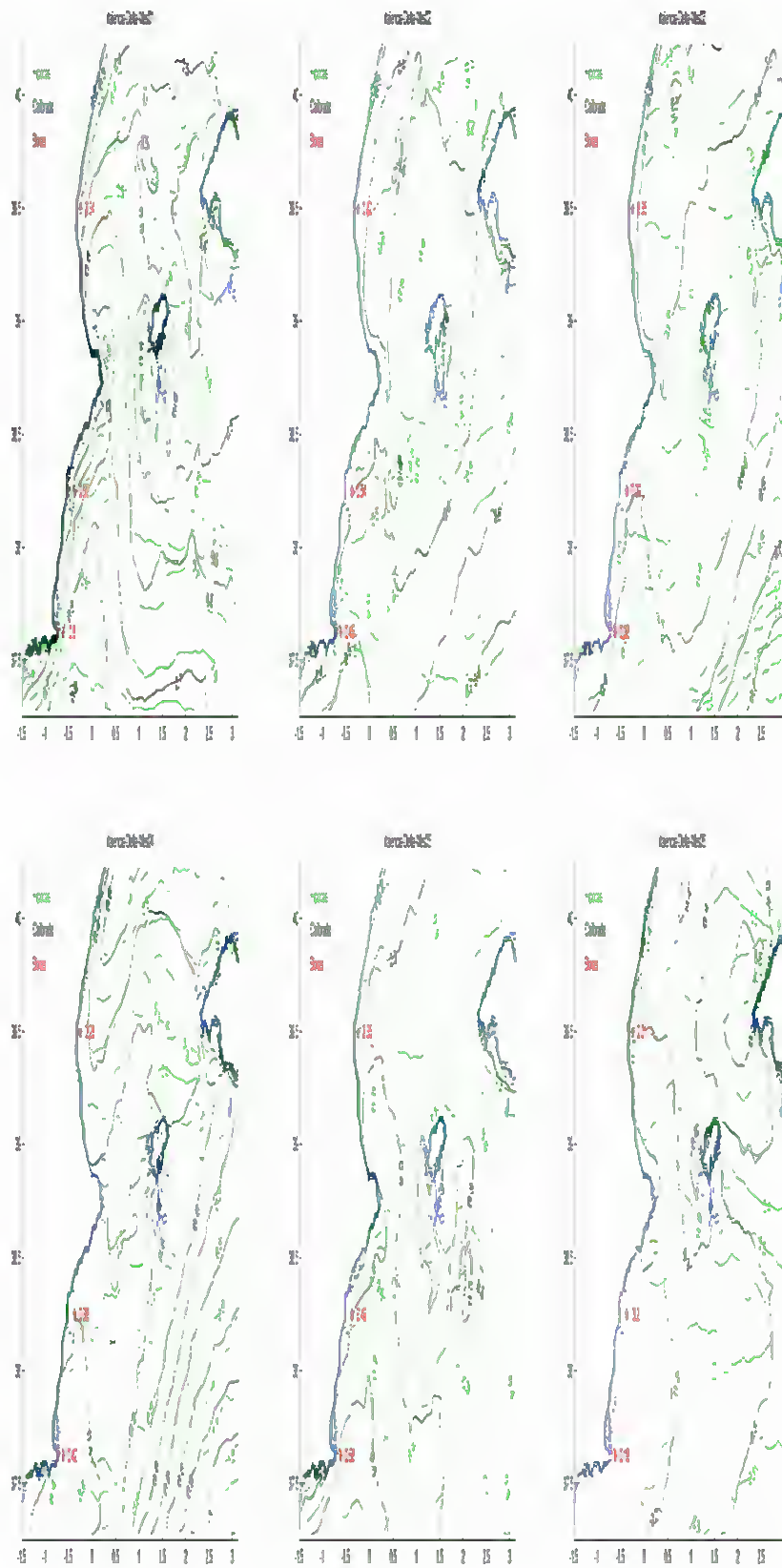






Figura 3.36. Distribución espacial de  $\delta$  para los primeros seis meses del año



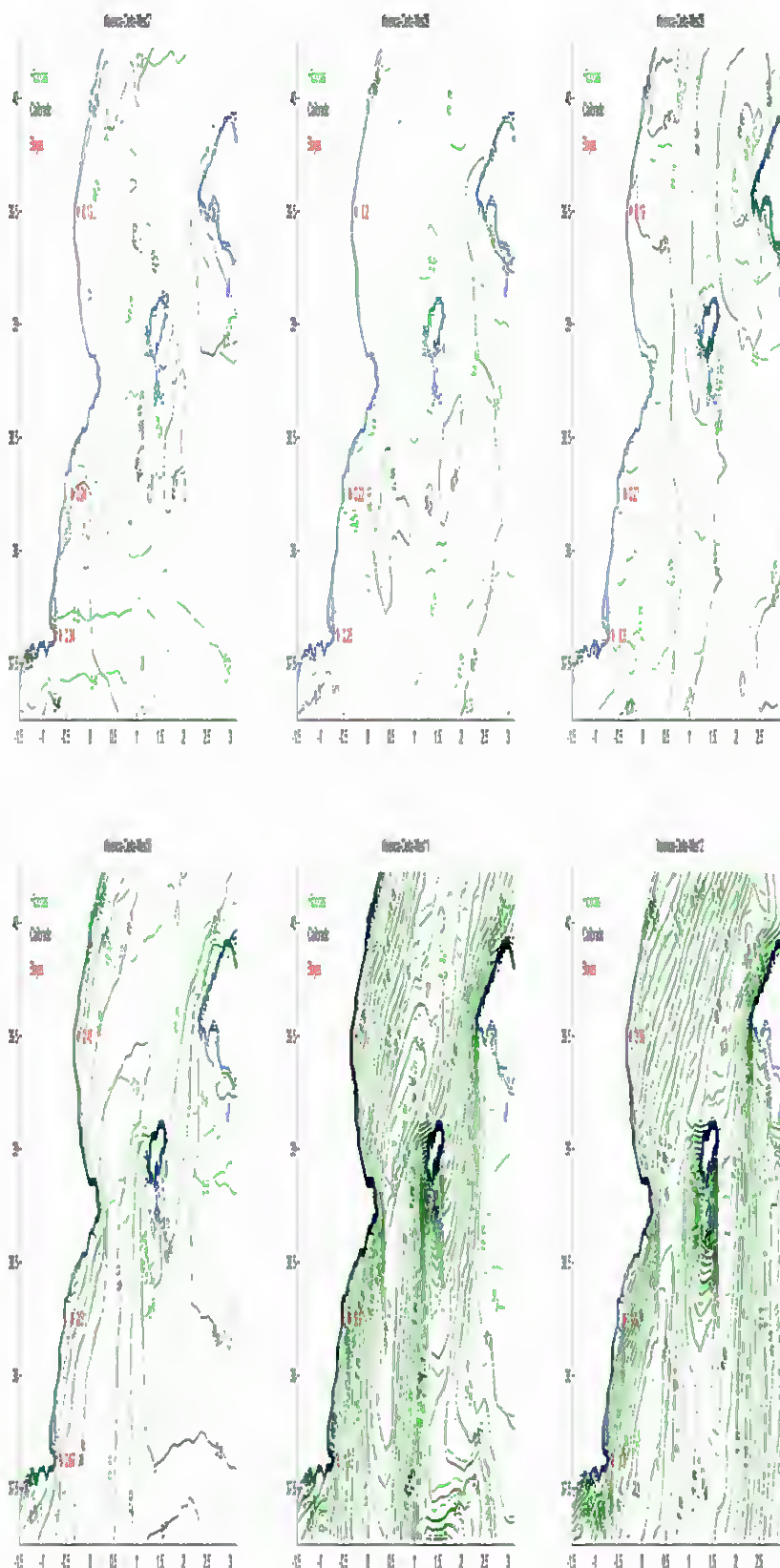




Figura 3.37. Distribución espacial de  $\delta$  para los últimos seis meses del año



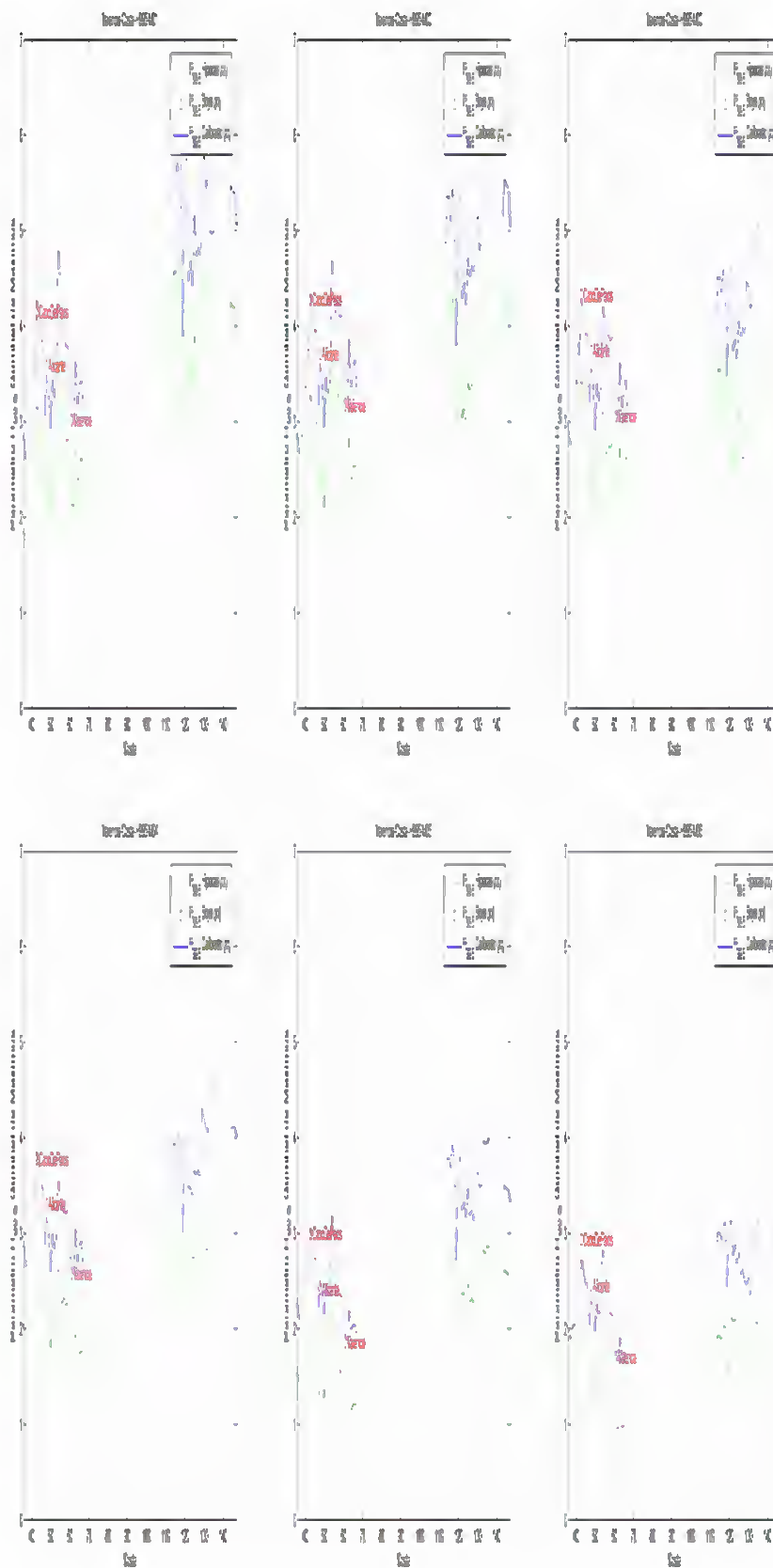




Figura 3.38. Distribución de  $H_{s,99.5\%}$  en la costa para los seis primeros meses del año



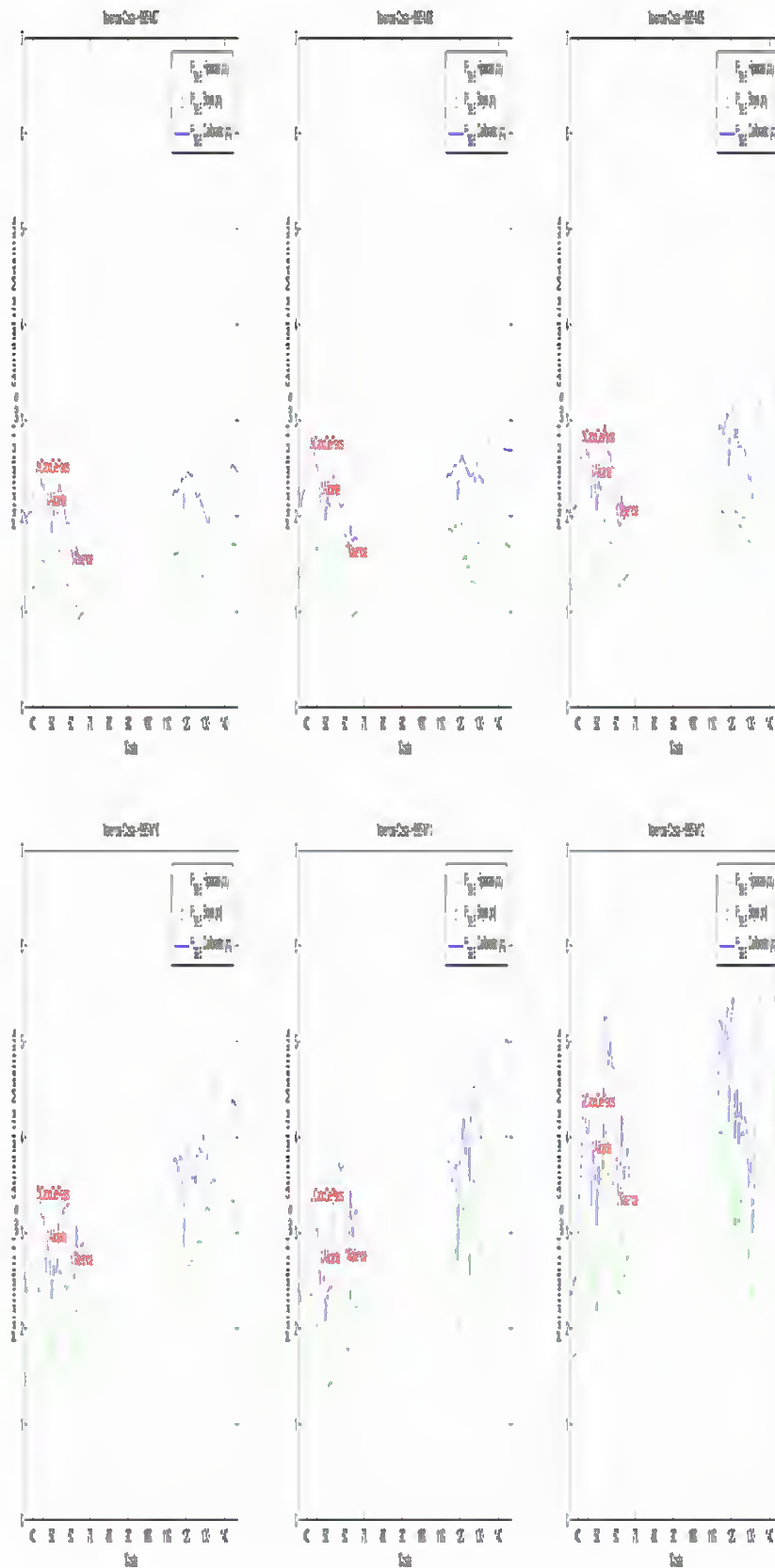




Figura 3.39. Distribución de  $H_{s,99,5\%}$  en la costa para los seis últimos meses del año





Figura 3.40. Distribución de  $\delta$  en la costa para los seis primeros meses del año 2010 y 2011.

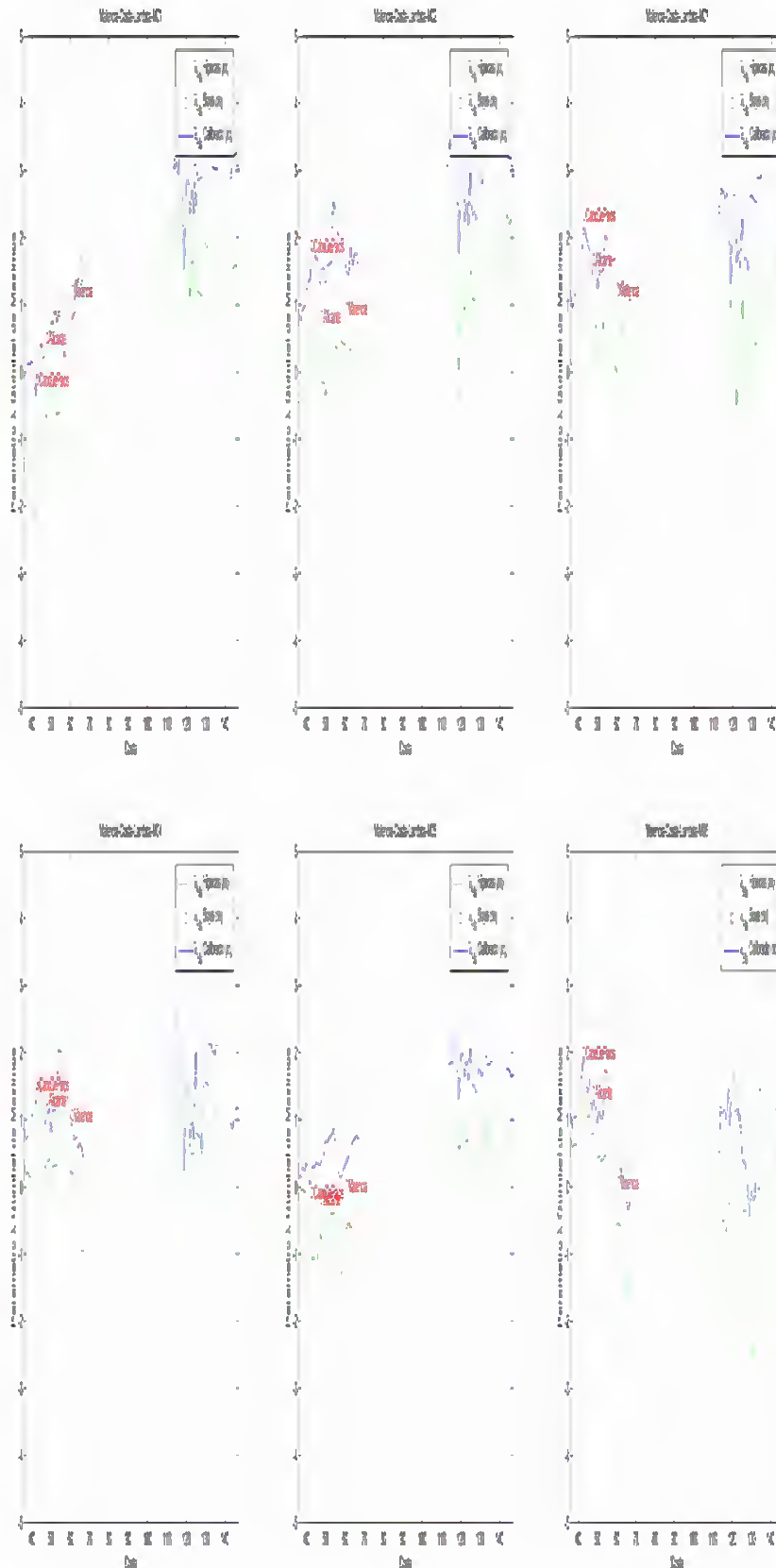
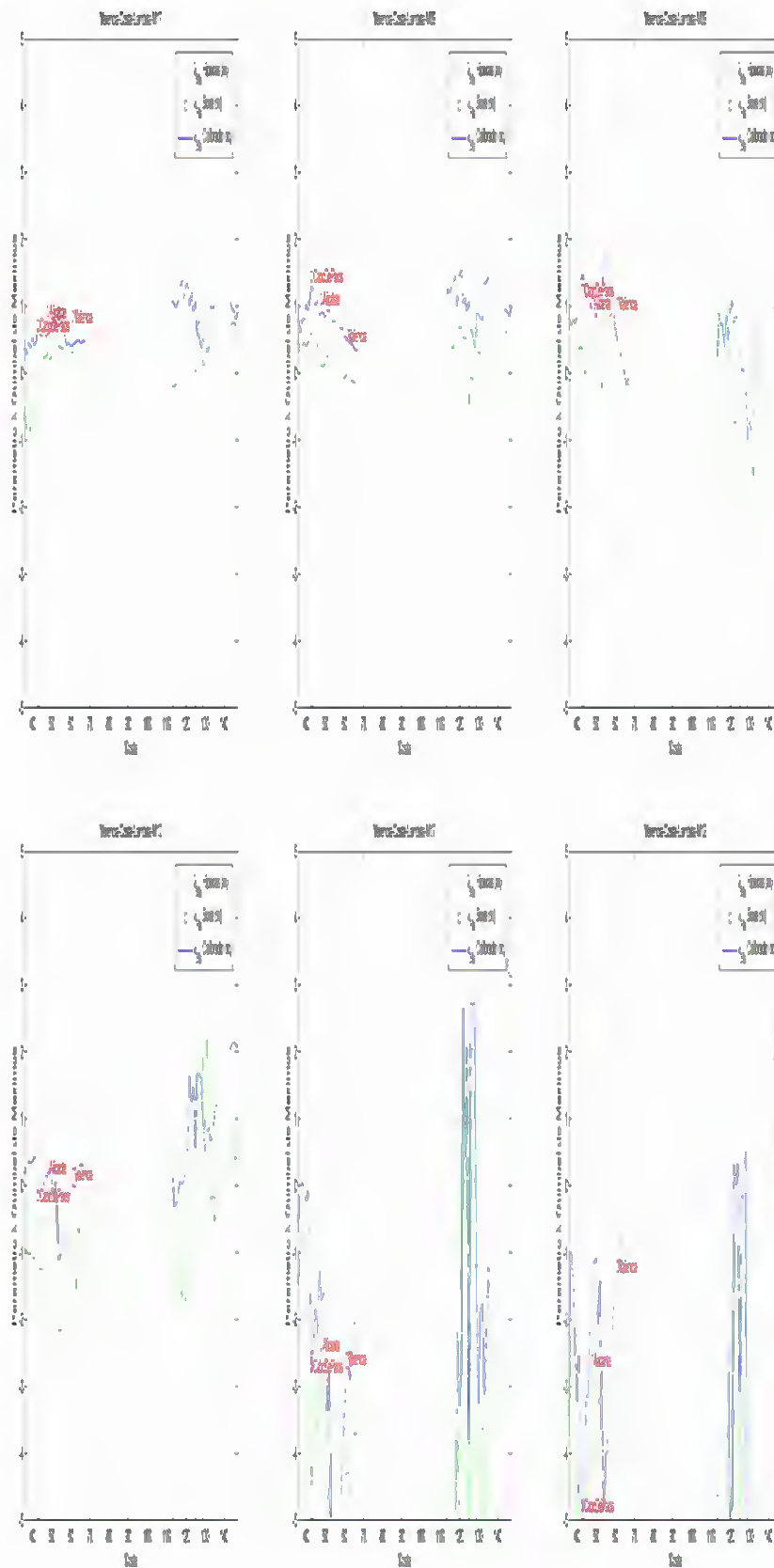






Figura 3.43. Distribución de  $\lambda$  en la costa para los seis últimos meses del año





### 3.4. Parámetros finales de $H_s$

Tras la calibración del régimen medio de  $H_s$  y del régimen medio-alto de  $H_s$ , en la zona de Valencia, se recompone la serie temporal a través de una transformación potencial definida para todo el campo de alturas de ola (ver apartado 2.11):

$$H_{s,c}(x,t) = b(x)H_s(x,t)^{c(x)}$$

con:

$H_{s,c}(x,t)$ , es la serie temporal de  $H_s$  calibrada

$H_s(x,t)$ , es la serie temporal de  $H_s$  sin calibrar calibrada

$b(x)$  y  $c(x)$  son los parámetros finales de la calibración

Así, en la figura 3.44, se representa  $b(x)$  y en la figura 3.45 se muestra  $c(x)$  para la zona de Valencia.

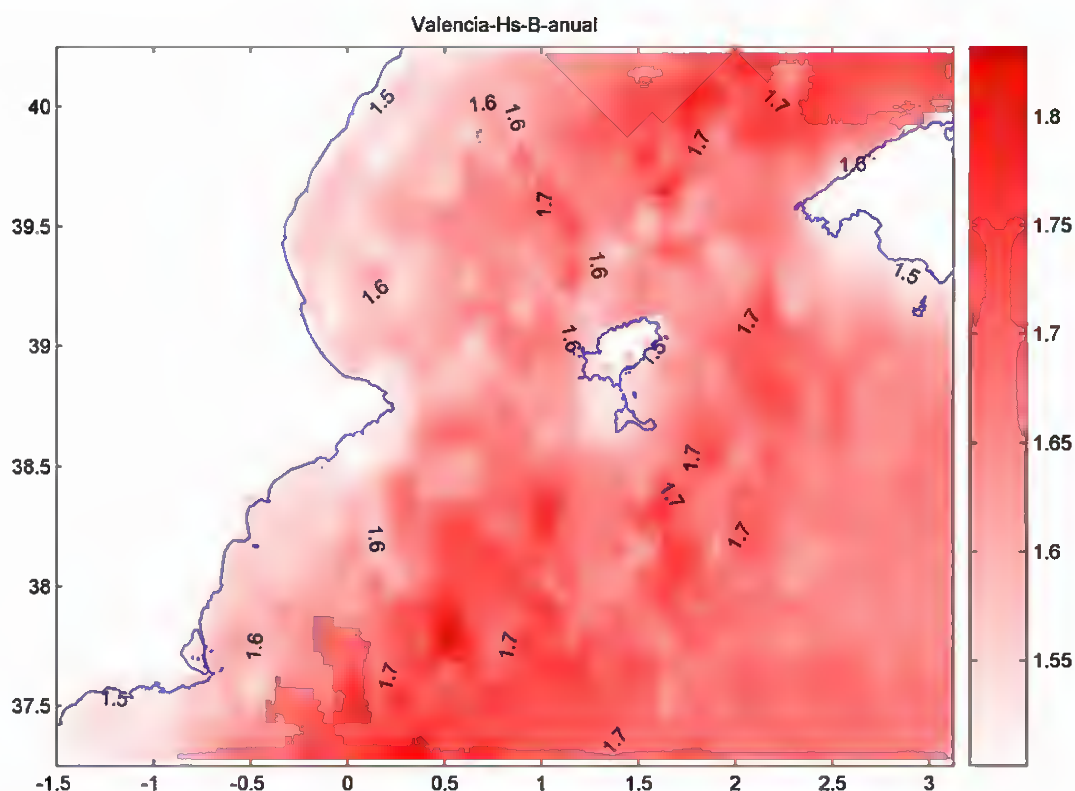


Figura 3.44.  $b(x)$  en la zona de Valencia



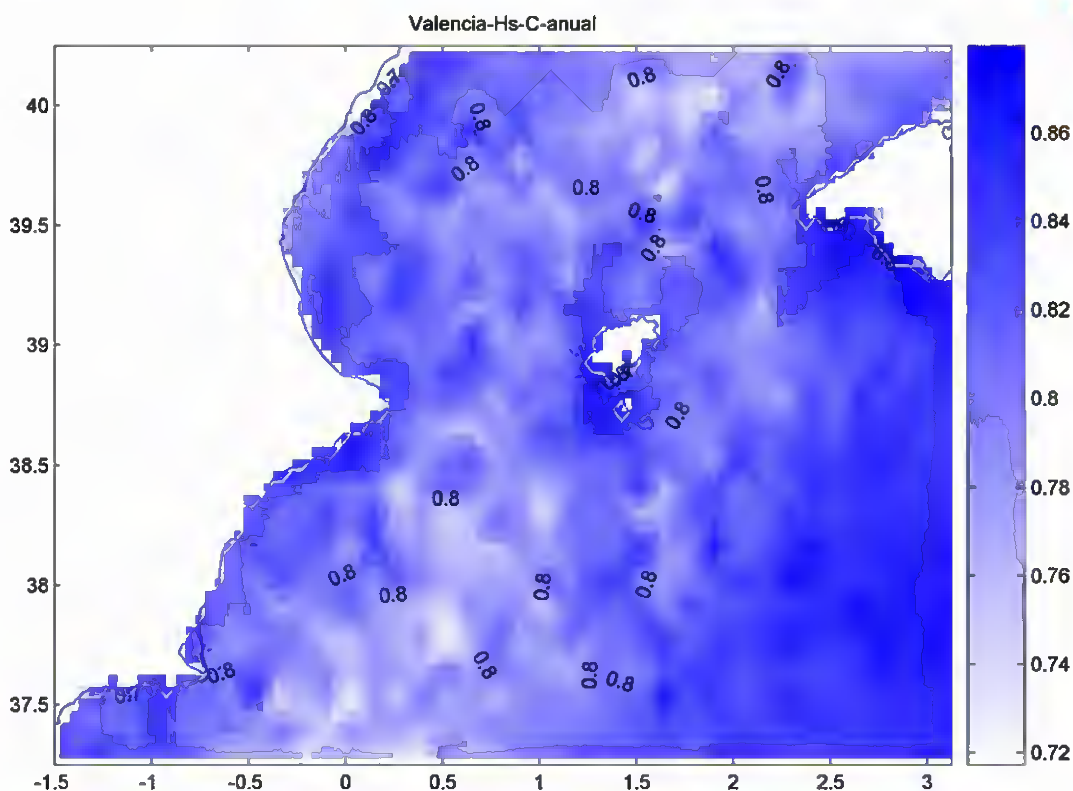


Figura 3.45.  $c(\mathbf{x})$  en la zona de Valencia

### 3.5. Régimen medio de $T_m$

El régimen medio de  $T_m$  se caracteriza por la determinación de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución Lognormal ajustada entre el 1% y 99% de probabilidad acumulada. La descomposición en 4 modos por la técnica EOF de ambos parámetros se muestra en las figuras 3.47 y 3.49, pero previamente a la descomposición en modos, se les resta la media temporal, que se muestra en las figuras 3.46 y 3.48. En la figura 3.46 se observa como el oleaje tiene periodos mayores en las zonas más distantes a la costa, pues la media temporal del parámetro  $\mu$  (media de  $T_m$ ) es mayor.



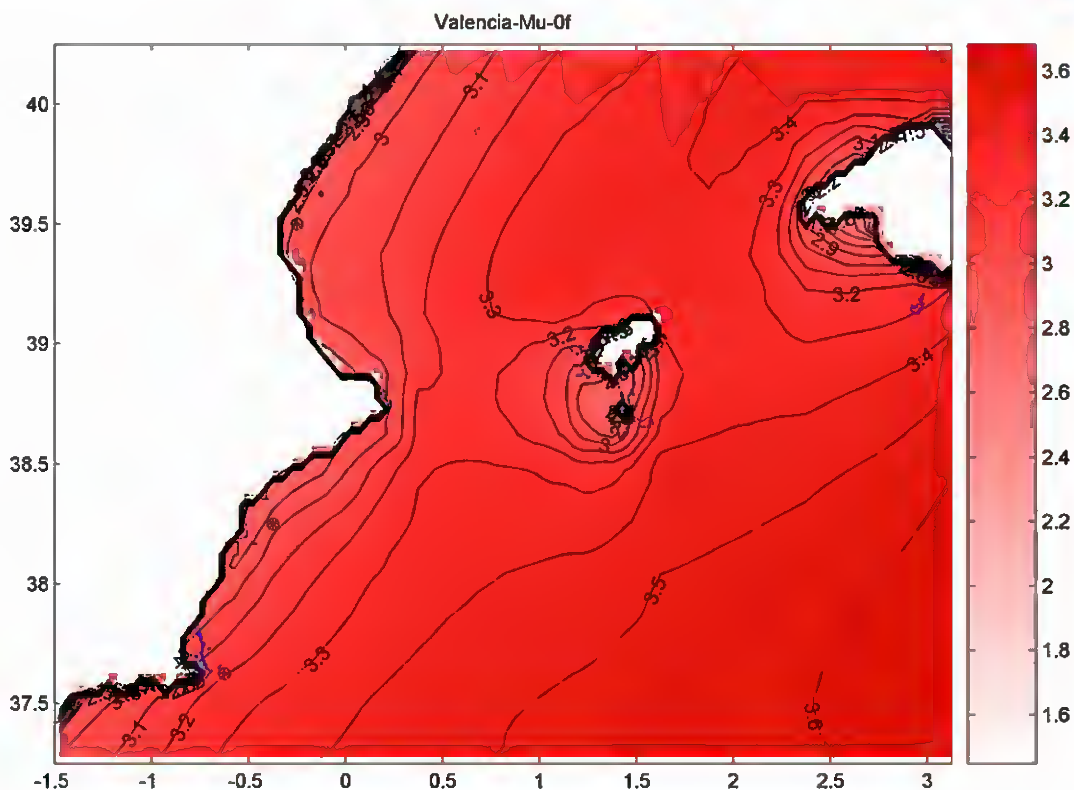


Figura 3.46. Media temporal del parámetro  $\mu$  (en segundos)

Las amplitudes temporales del primer modo ( $g_1$ ), tanto de  $\mu$  y  $\sigma$ , en las figuras 3.47 y 3.49, muestran la fluctuación estacional del clima marítimo. En la figura 3.47, el primer modo espacial ( $f_1$ ) muestra el aumento del periodo medio al separarse de la costa y el segundo modo espacial ( $f_2$ ) señala la fluctuación norte-sur.

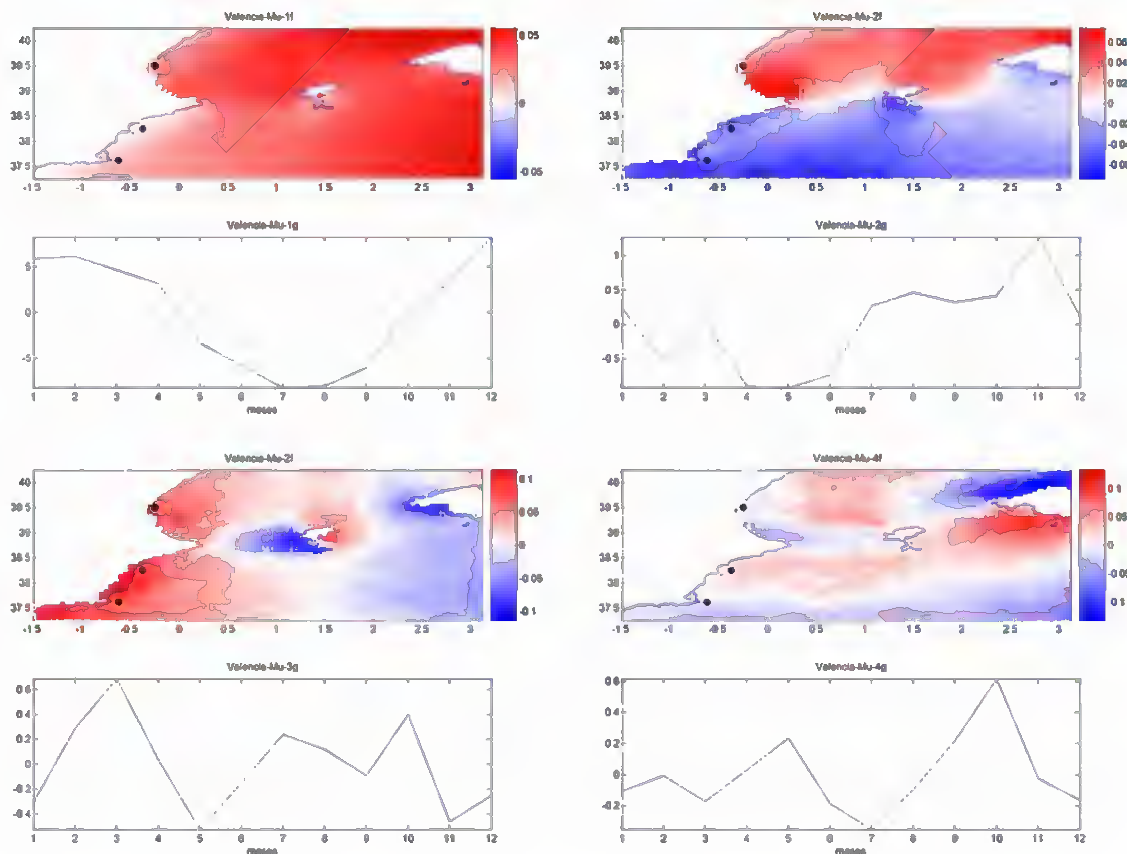


Figura 3.47. Cuatro primeros modos del parámetro  $\mu$

En la figura 3.48 se observa como la variabilidad del periodo del oleaje aumenta en las proximidades de las costas orientadas al norte, pues la media temporal del parámetro  $\sigma$  (desviación típica de  $T_m$ ) es mayor.



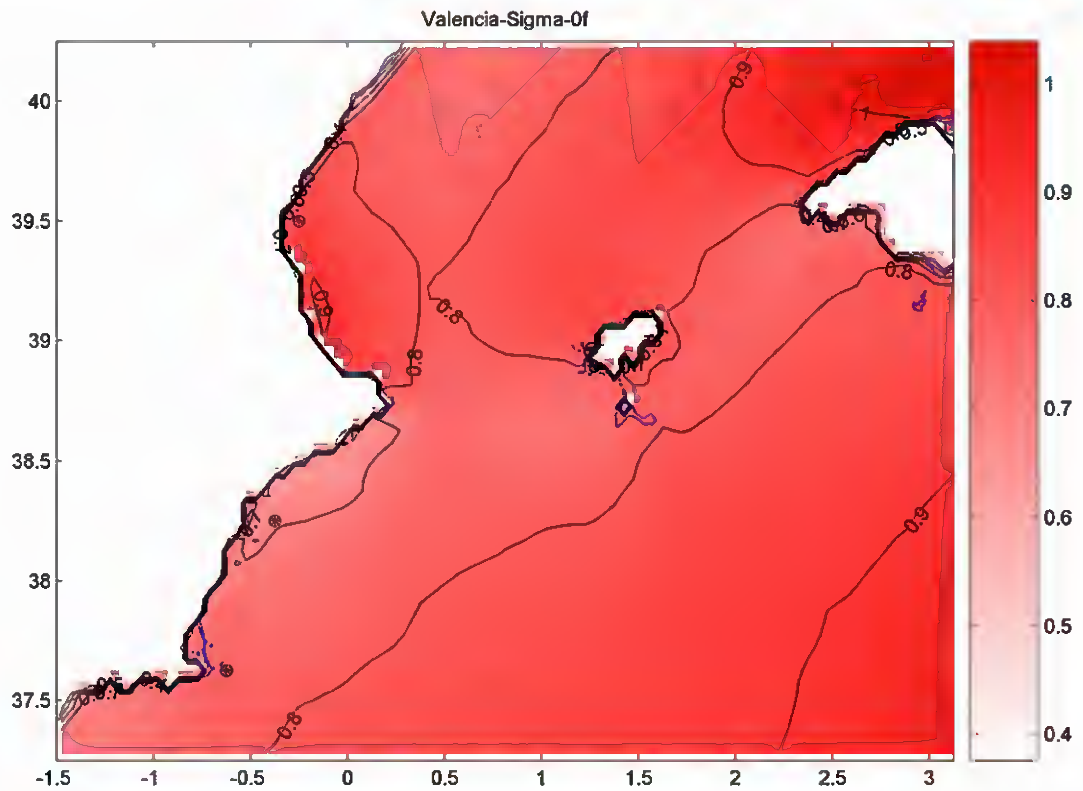


Figura 3.48. Media temporal del parámetro  $\sigma$  (en segundos)

En la figura 3.49 el segundo modo espacial ( $f_2$ ) señala la fluctuación norte-sur. Se señala que los modos no tienen por que tener explicación física, son el resultado de una técnica de descomposición de variables espacio-temporales.



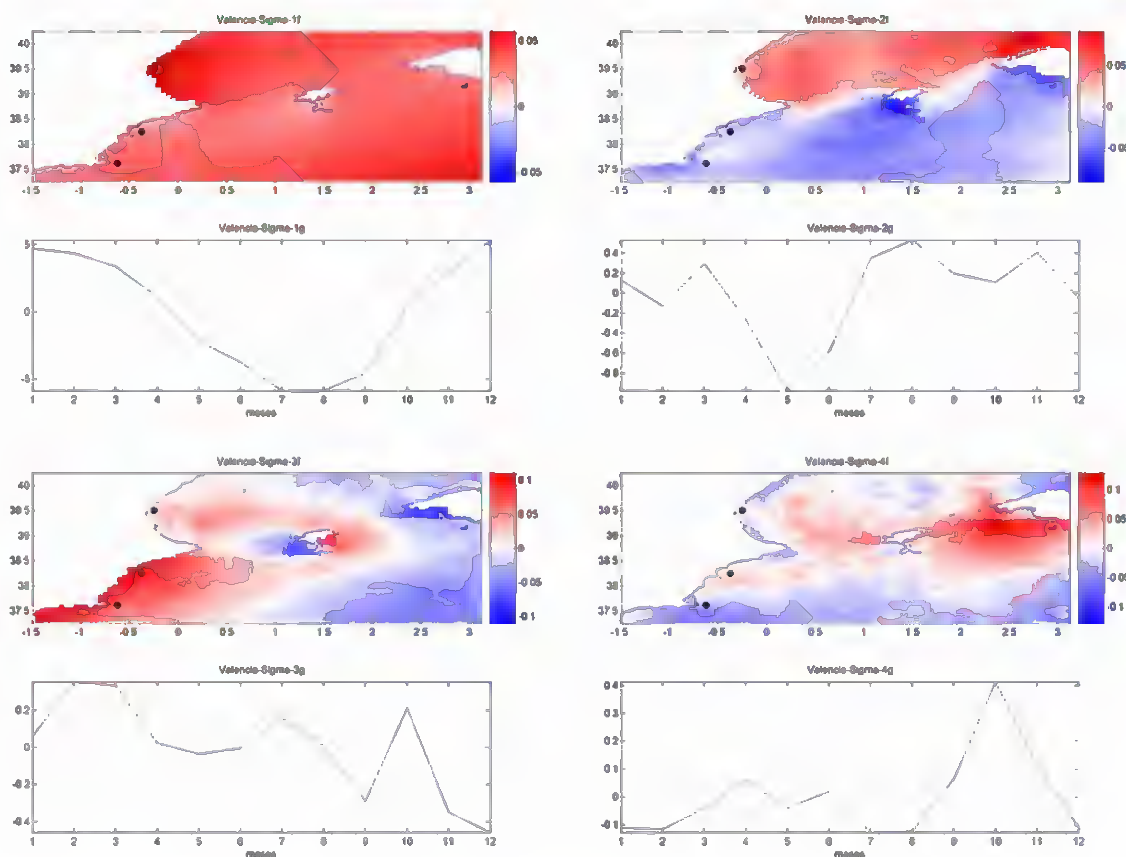


Figura 3.49. Cuatro primeros modos del parámetro  $\sigma$

Una vez determinados los cuatro modos de cada parámetro de la distribución  $\mu$  y  $\sigma$  de HIPOCAS y con los parámetros de la distribución de las boyas se obtienen los parámetros de la calibración que minimizan la función objetivo  $J$  (que es el error definido en el apartado 2.9). En la figura 3.50 se muestra la evolución de  $J$  en la calibración de  $\mu$  y de  $\sigma$  con el método SCE-UA.





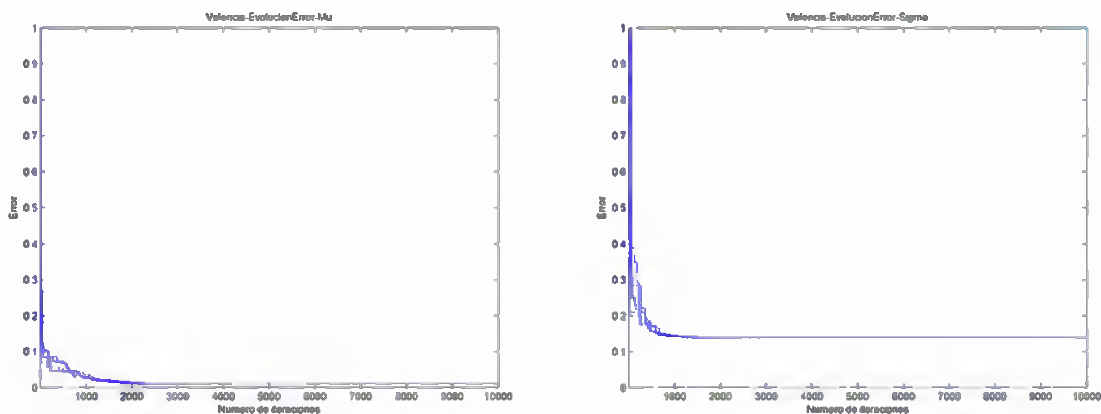


Figura 3.50. Evolución de la función objetivo a minimizar, para  $\mu$  y  $\sigma$

En la figura 3.51 se muestra el valor de los parámetros obtenidos en la calibración de  $\mu$  y  $\sigma$ , es decir  $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1, c_0\}$  definidos en el apartado 2.8, que en la figura son  $\{A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, T\}$  respectivamente.







Valencia-Parametros

Parametros de la calibracion de  $\mu$  y  $\sigma$  (lognormal) con 4 modos:

Parametro  $\mu$  (lognormal):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.0106  
 A1=2.50; A2=0.82; A3=0.42; A4=0.46; A0=0.19  
 B0=2.50; B1=0.49  
 T=0.00

Parametro  $\sigma$  (lognormal):

Numero de terminos de EOF que explican mas del 95% de la varianza:1  
 Error acumulado de la calibracion:0.139  
 A1=0.75; A2=0.77; A3=0.56; A4=0.58; A0=0.29  
 B0=2.50; B1=0.90  
 T=0.38

Longitud inicial=-1.500

Latitud inicial=37.250

Longitud final=3.125

Latitud final=40.250

Figura 3.51. Parámetros obtenidos en la calibración de  $\mu$  y  $\sigma$

Una vez obtenidos los parámetros de la calibración, se determinan los parámetros de la distribución Lognormal del régimen medio de  $T_m$  calibrados. En la figura 3.52 se muestran estos parámetros ( $\mu$  y  $\sigma$ ) antes y después de calibrar, comparándolos con los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas; sólo se comparan los de las posiciones de las boyas, y la comparación se hace relativizándola con el valor medio anual de las boyas. Se observa en la figura como se aproximan, tras la calibración, a la bisectriz; esto muestra la semejanza entre  $\mu$  y  $\sigma$  de las boyas y de HIPOCAS calibrado en las posiciones de las boyas. Se pasa de tener una correlación de los puntos con la bisectriz del 21% al 47% en  $\mu$  y del 50% al 75% en  $\sigma$ , haciéndose muy apreciable la mejora conseguida. Nótese que a pesar de que el valor de la correlación conseguida en la calibración de  $\mu$  no es muy elevado, la nube de puntos se sitúa sobre la bisectriz.



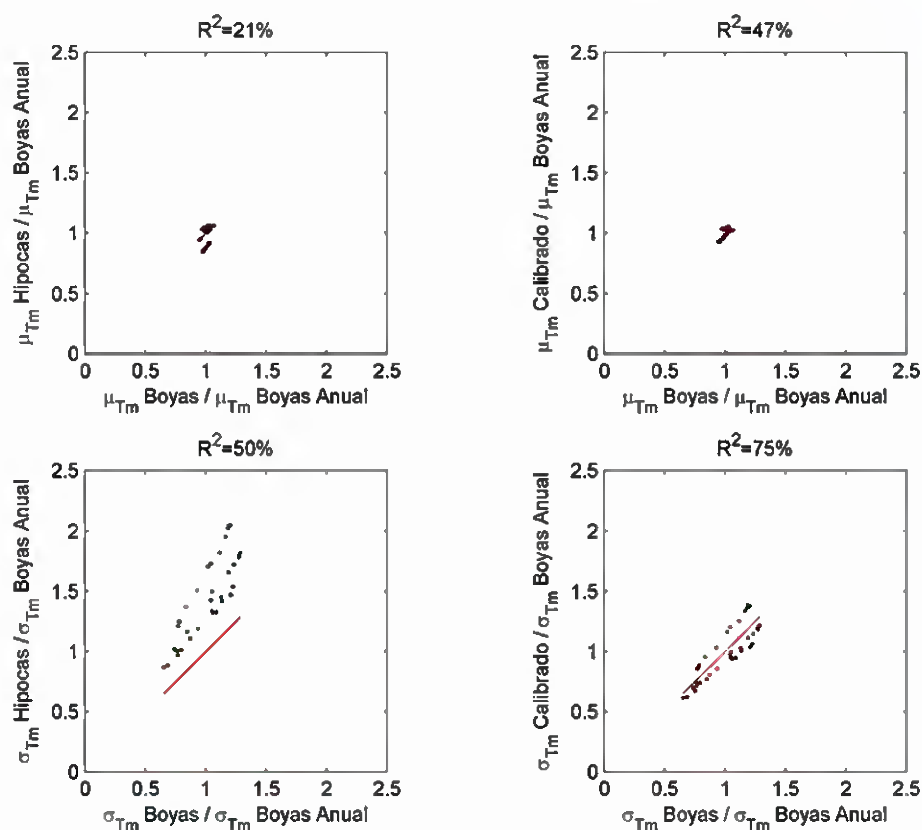


Figura 3.52. Comparación relativa entre  $\mu$  y  $\sigma$  antes y después de calibrar HIPOCAS, con los de las boyas

También se puede constatar la mejora producida comparando los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  a lo largo del tiempo en las posiciones de las boyas. En las figuras 3.53, 3.54 y 3.55 se comprueba como, tras la calibración, en todas las boyas de la zona de la calibración, tanto  $\mu$  como  $\sigma$  de HIPOCAS calibrado se aproxima a los determinados a partir de los datos de las boyas corregidas. Se comprueba, para  $\mu$ , que en las boyas de Valencia y Alicante, la calibración no estropea el buen ajuste original de HIPOCAS, y sin embargo, si que mejora sustancialmente los resultados en Cabo de Palos, cuyo ajuste era peor.



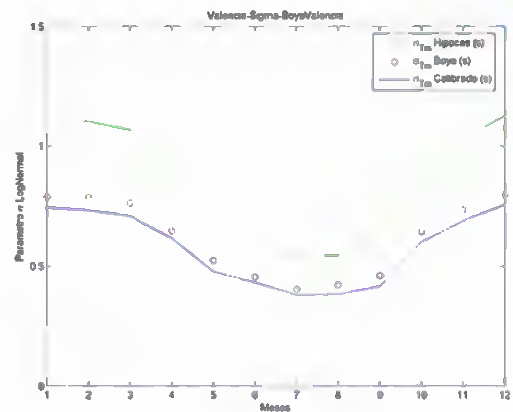
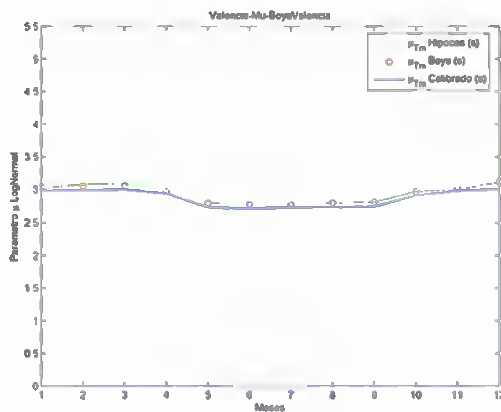


Figura 3.53. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Valencia

Figura 3.54. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Alicante

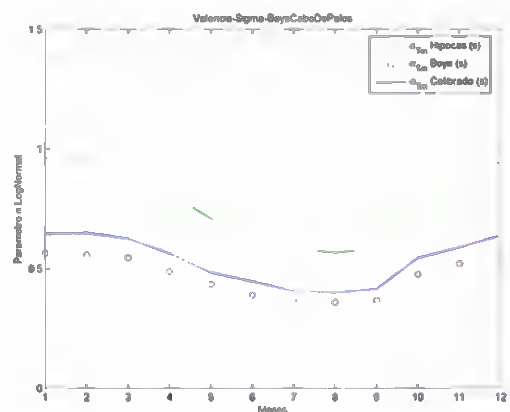
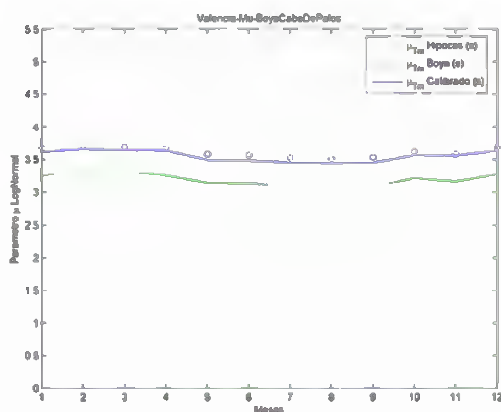
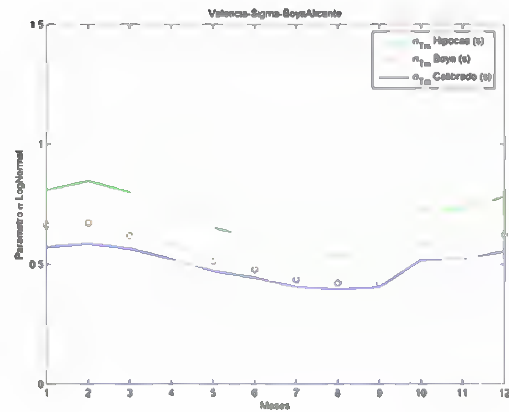
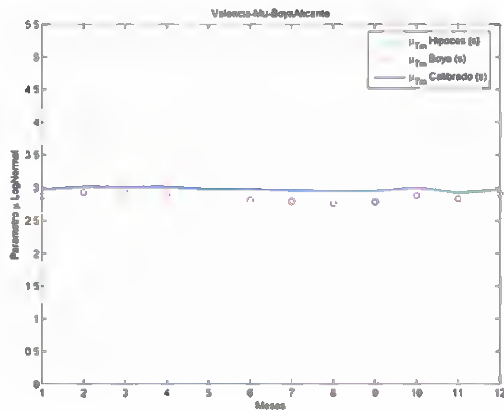


Figura 3.55. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Cabo de Palos





El resto de figuras que aparecen en este apartado muestran la distribución espacial de ambos parámetros ( $\mu$  y  $\sigma$ ), antes y después de calibrarse, así como los valores utilizados de las boyas corregidas para la calibración. Se muestra la distribución espacial de la media temporal de ambos parámetros en las figuras 3.56 y 3.59; así como las distribuciones espaciales mes a mes, en las figuras 3.57 y 3.58 de  $\mu$  y en las figuras 3.60 y 3.61 de  $\sigma$ . Así se tienen los regímenes medios mensuales de todos los puntos de la zona definidos con los dos parámetros de la distribución  $\mu$  y  $\sigma$ , para cada posición y para cada mes.

En las figuras 3.62 y 3.63 se representa  $\mu$ , mes a mes, a lo largo de la línea de costa y en las figuras 3.64 y 3.65 se muestra  $\sigma$ . La línea de costa se compone de tres tramos, la costa peninsular, la costa de Ibiza y la costa de Mallorca que está en el interior de la zona de calibración.



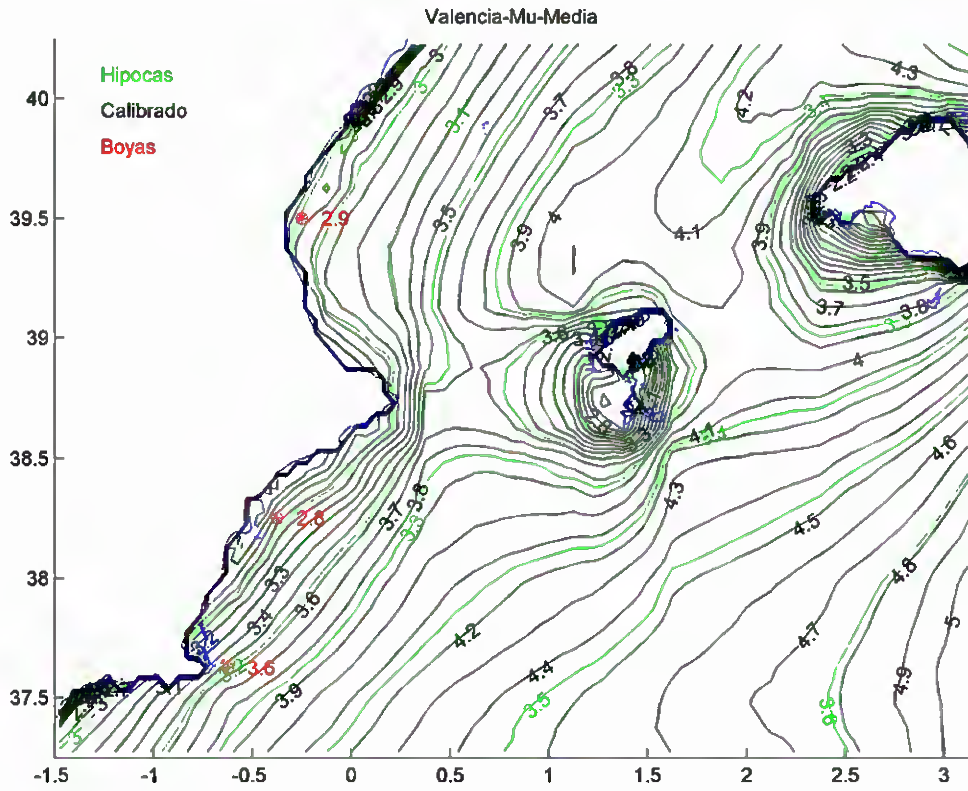


Figura 3.56. Distribución espacial de la media temporal de  $\mu$



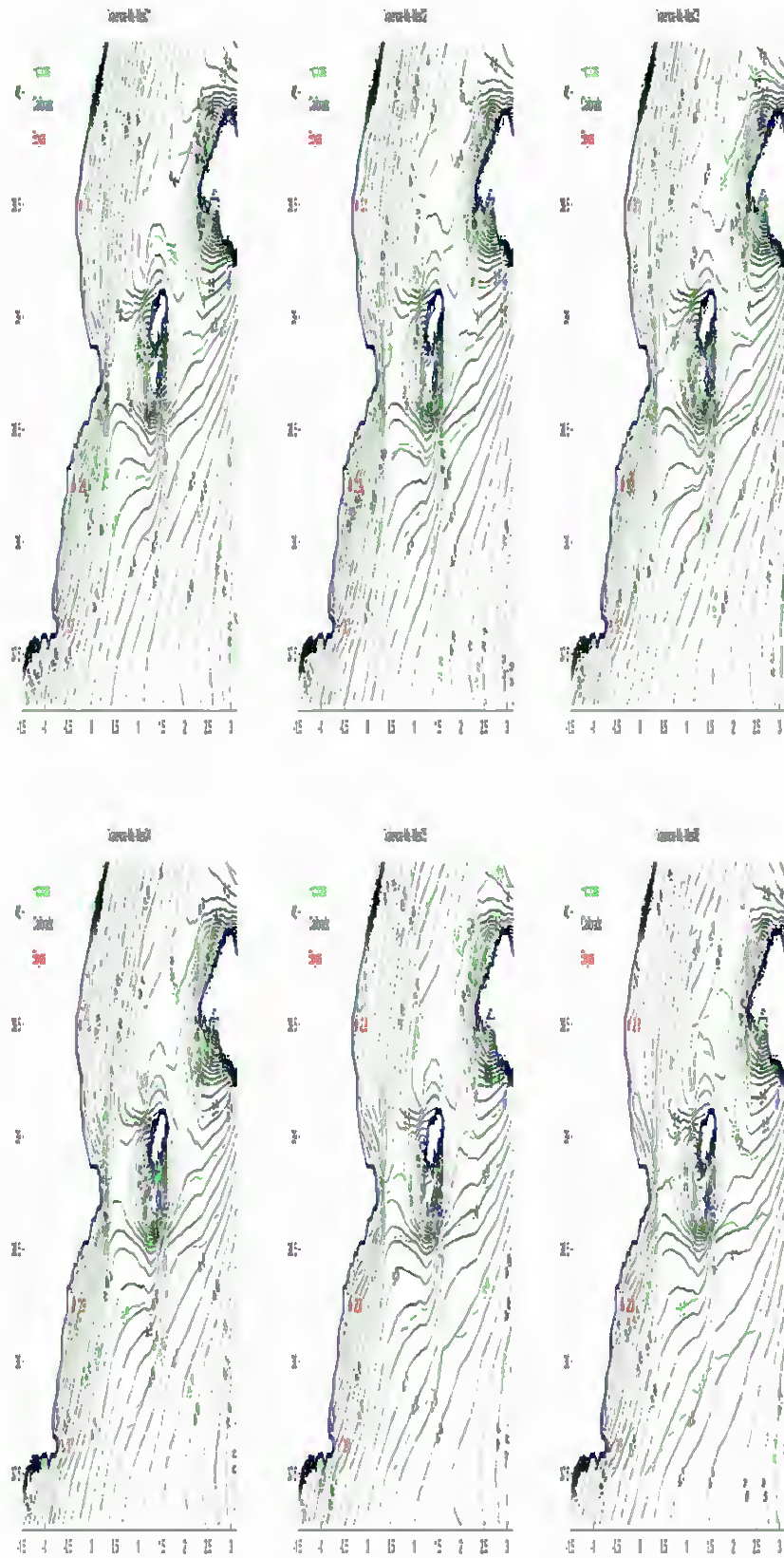




Figura 3.57. Distribución espacial de  $\mu$  para los seis primeros meses del año





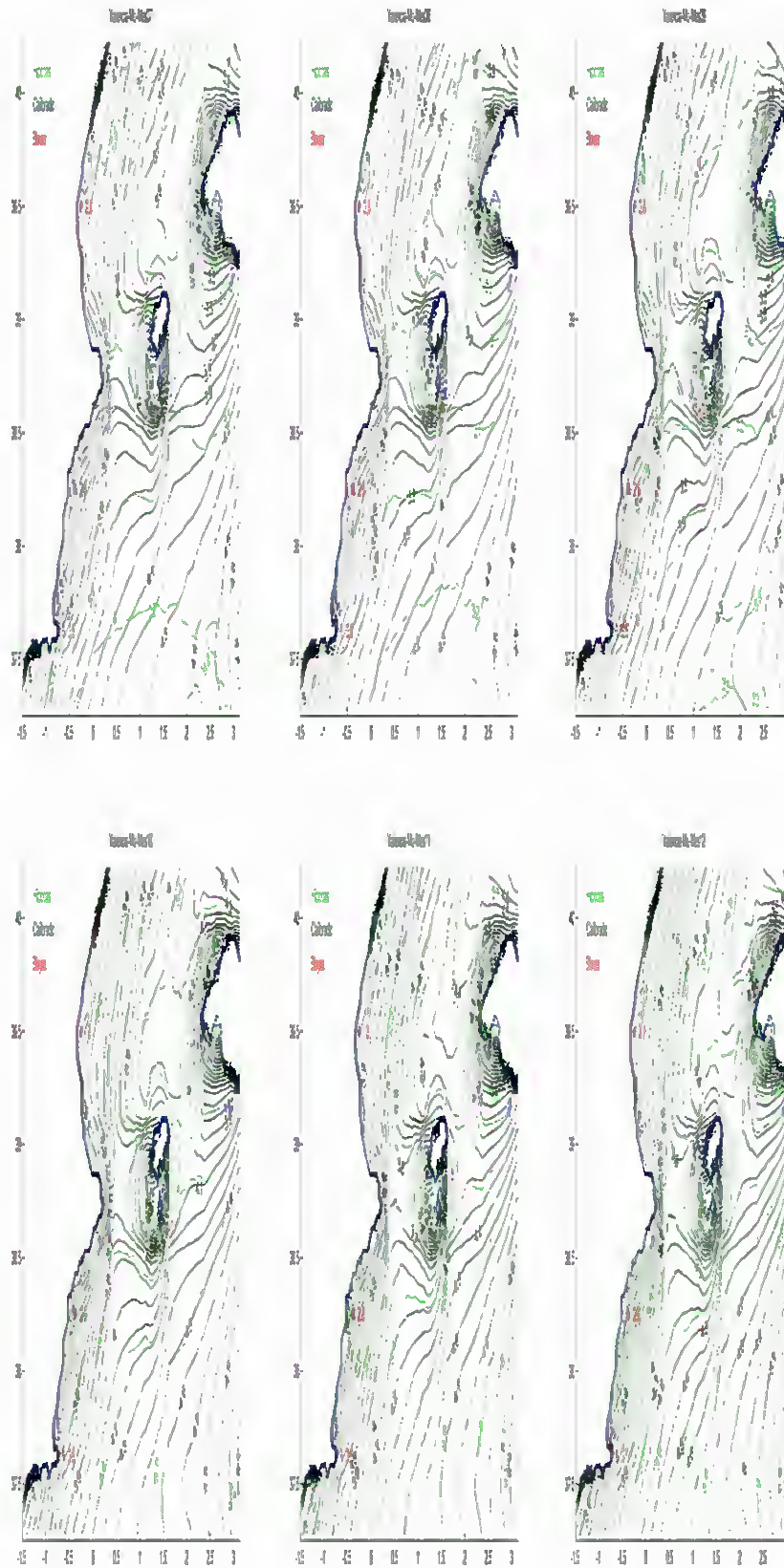
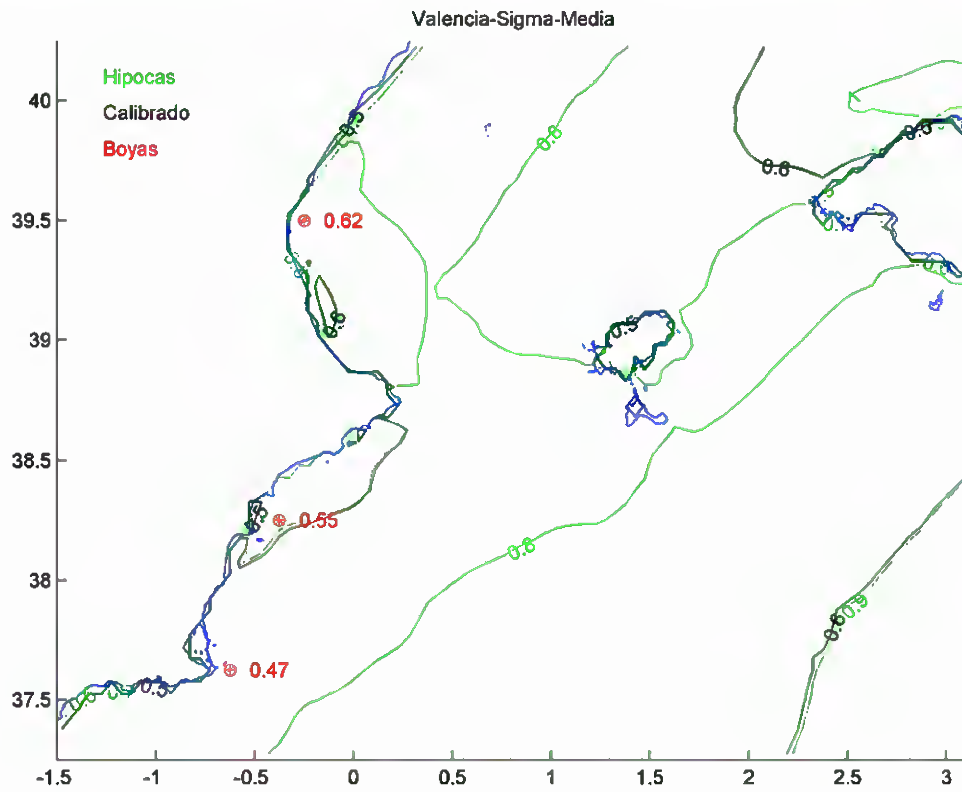






Figura 3.58. Distribución espacial de  $\mu$  para los seis últimos meses del año





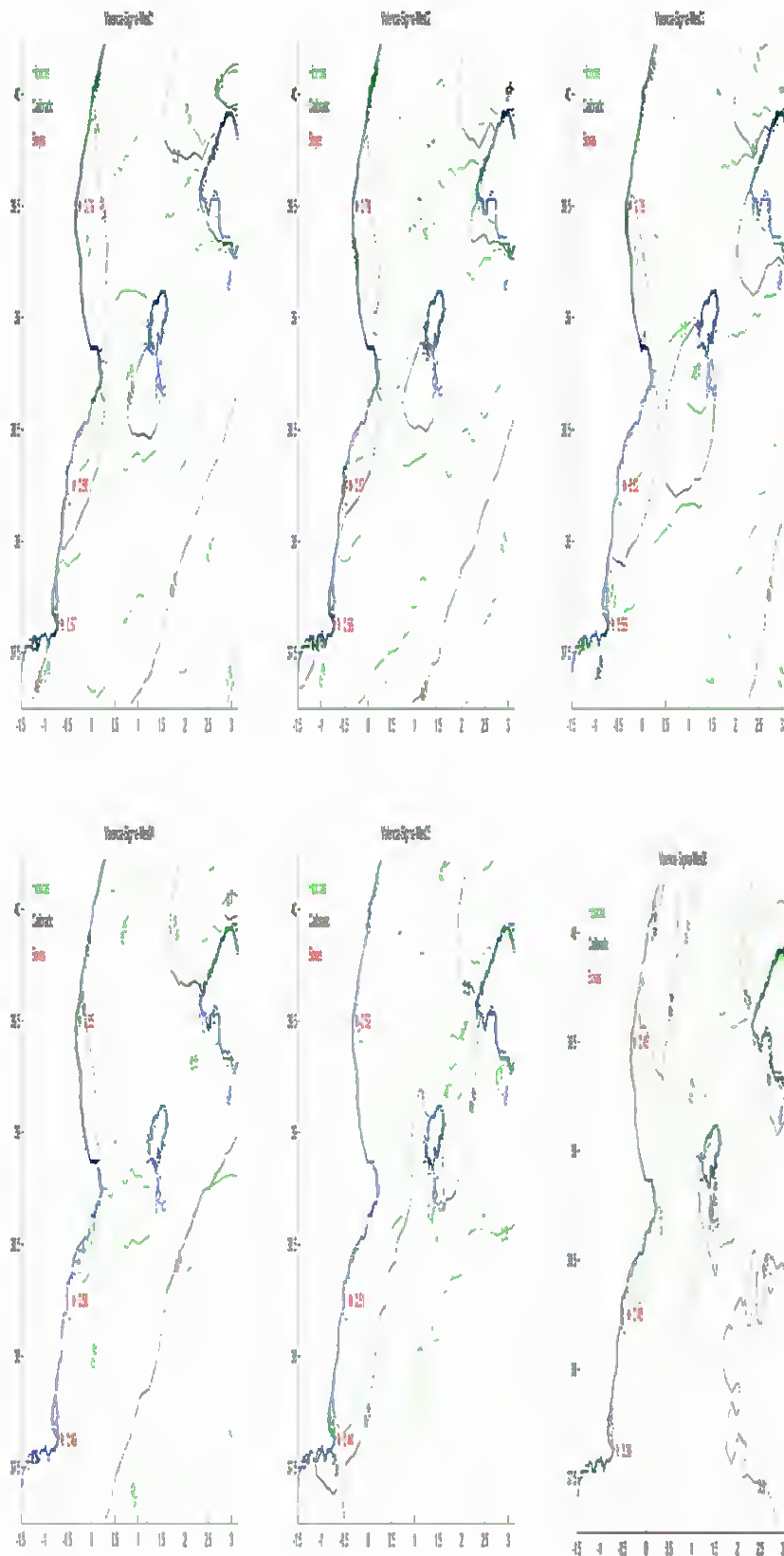


Figura 3.60. Distribución espacial de  $\sigma$  para los seis primeros meses del año



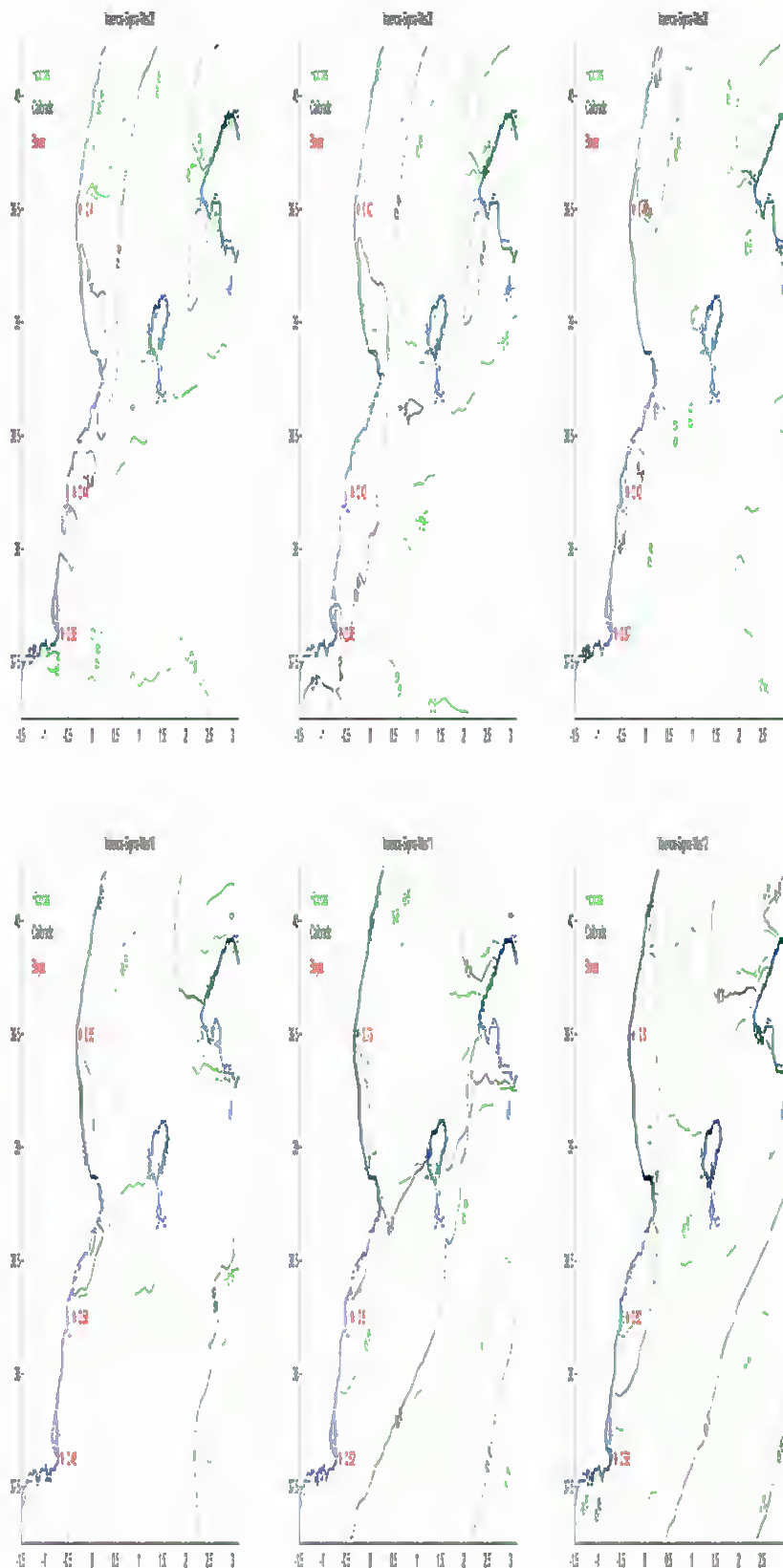


Figura 3.61. Distribución espacial de  $\sigma$  para los seis últimos meses del año





Fig

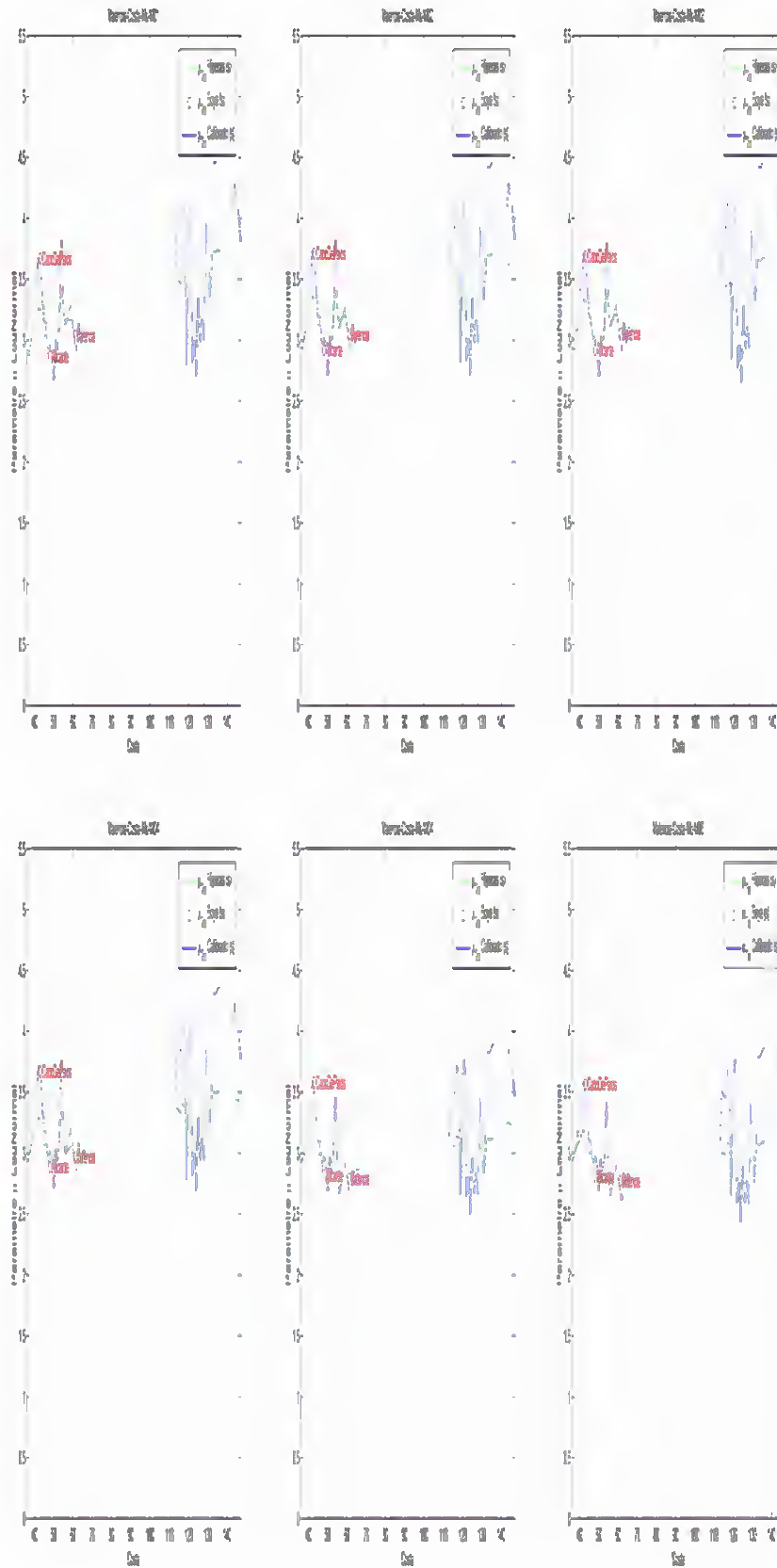
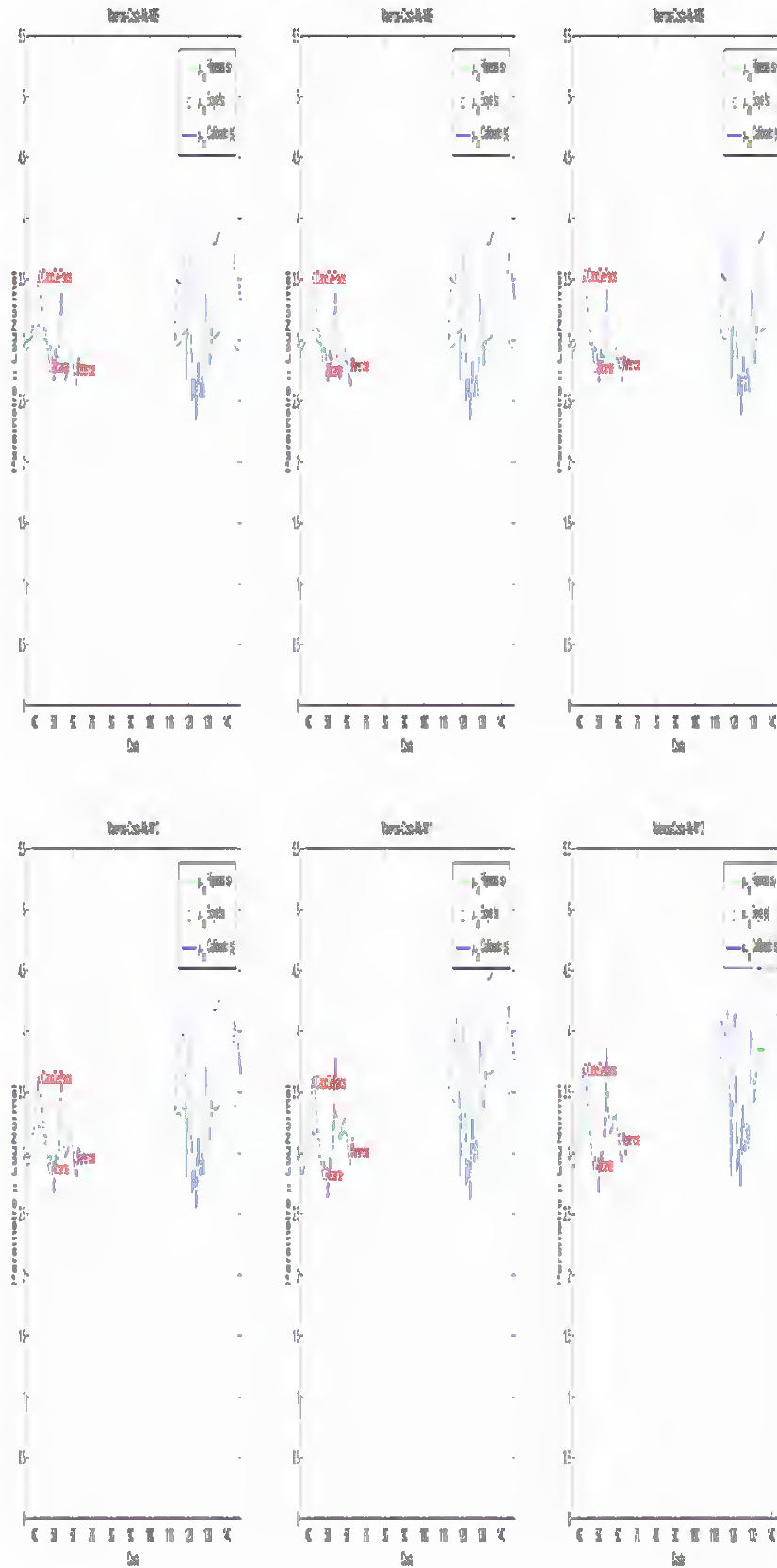




Figura 3.63. Distribución de  $\mu$  en la costa para los seis últimos meses del año









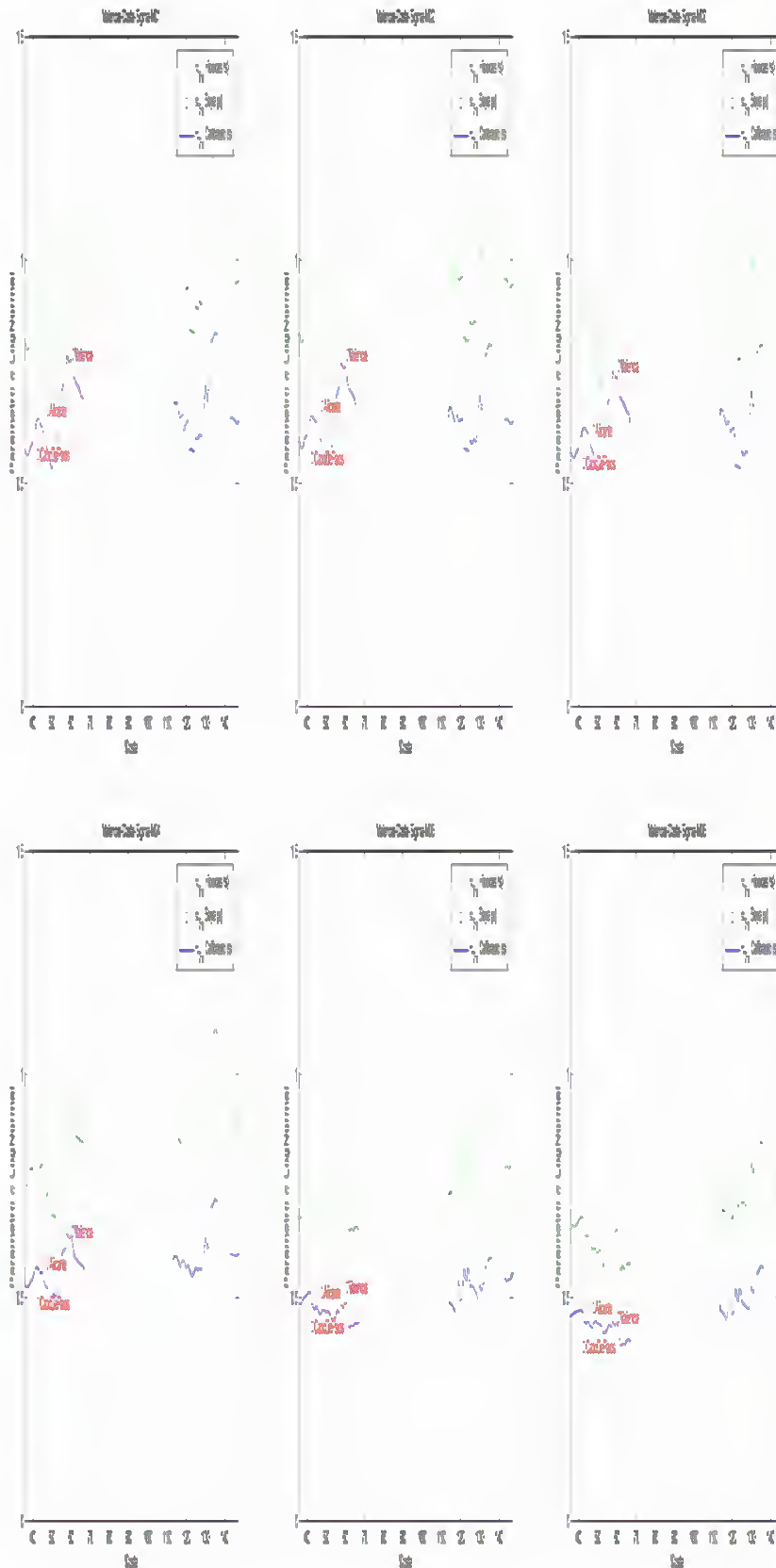




Figura 3.64. Distribución de  $\sigma$  en la costa para los seis primeros meses del año



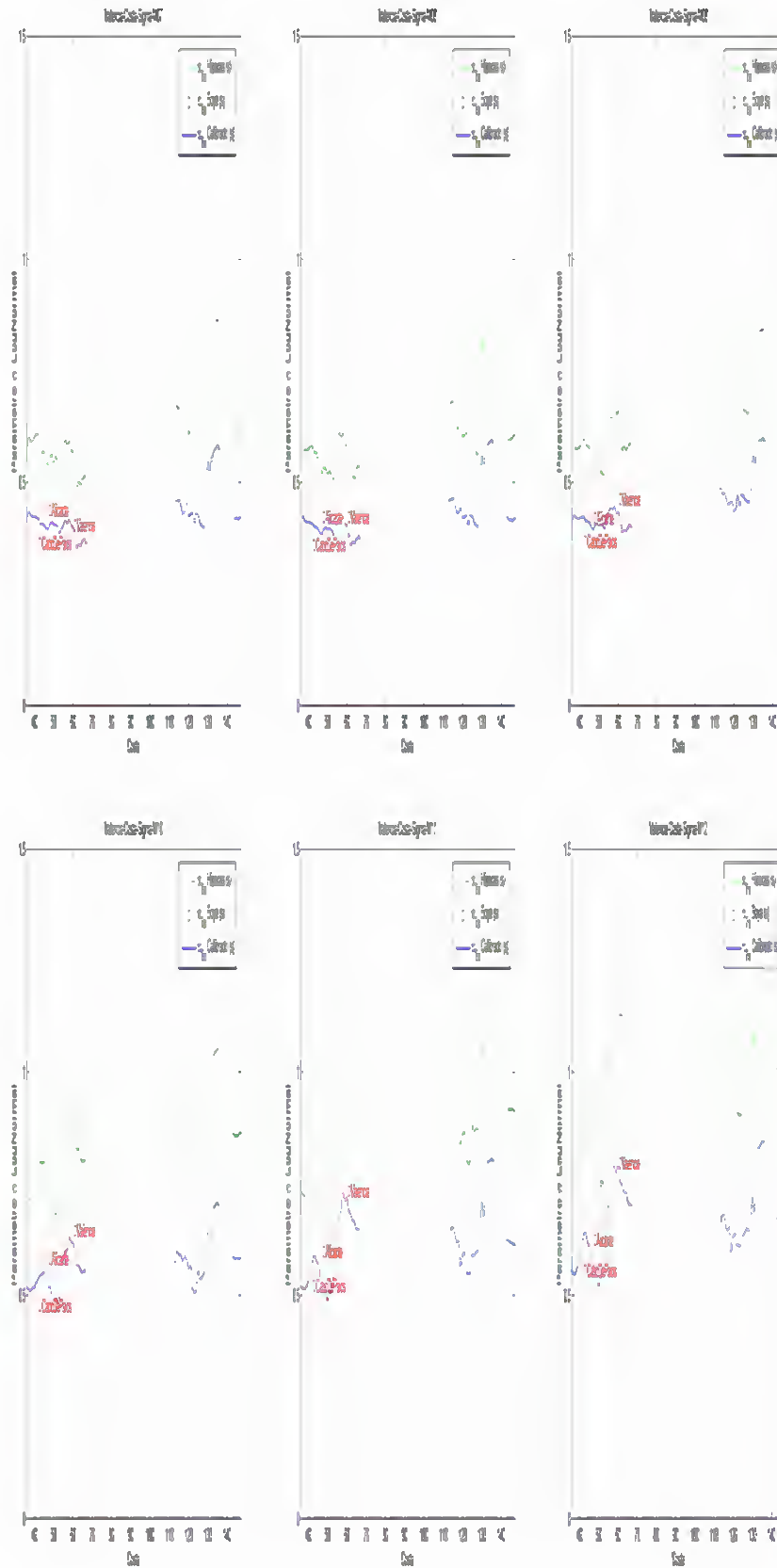


Figura 3.65. Distribución de  $\sigma$  en la costa para los seis últimos meses del año





### 3.6. Parámetros finales de $T_m$

Tras la calibración del régimen medio de  $T_m$  en la zona de Valencia, se recompone la serie temporal a través de una transformación potencial definida para todo el campo de alturas de ola (ver apartado 2.11):

$$T_{m,c}(\mathbf{x},t) = b(\mathbf{x})T_m(\mathbf{x},t)^{c(\mathbf{x})}$$

con:

$T_{m,c}(\mathbf{x},t)$ , es la serie temporal de  $T_m$  calibrada

$T_m(\mathbf{x},t)$ , es la serie temporal de  $T_m$  sin calibrar calibrada

$b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$  son los parámetros finales de la calibración

Así, en la figura 3.66, se representa  $b(\mathbf{x})$  y en la figura 3.67 se muestra  $c(\mathbf{x})$  para la zona de Valencia.



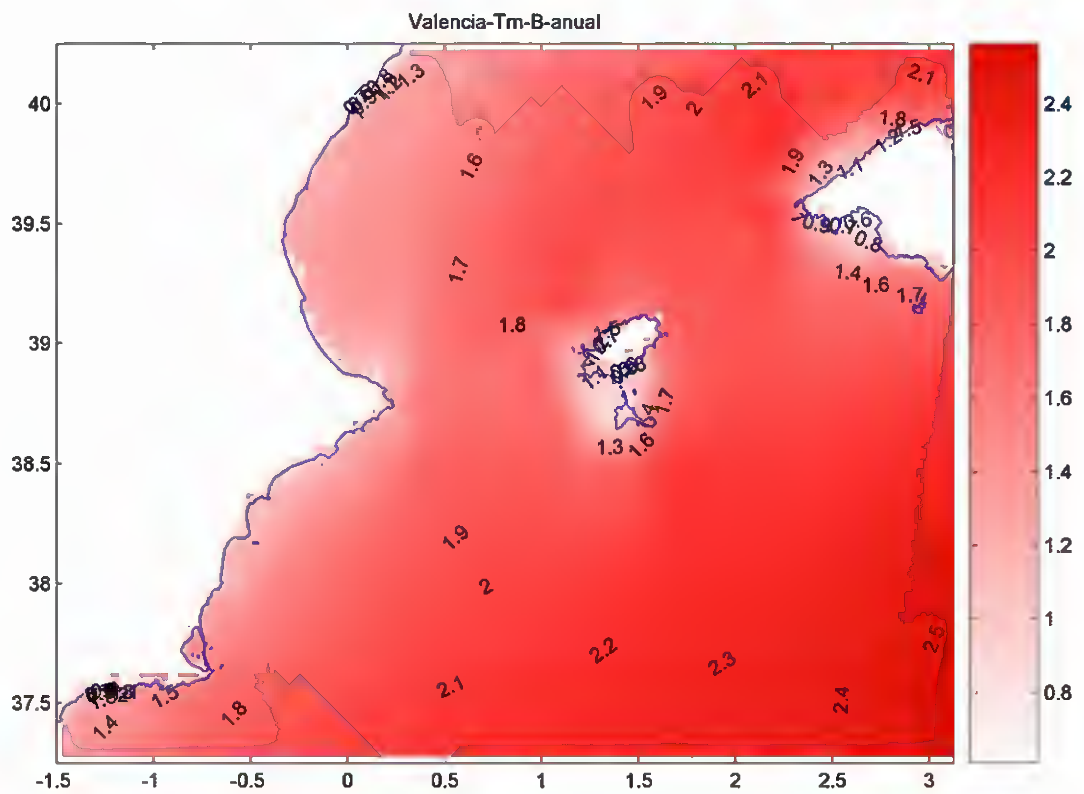


Figura 3.66.  $b(x)$  en la zona de Valencia



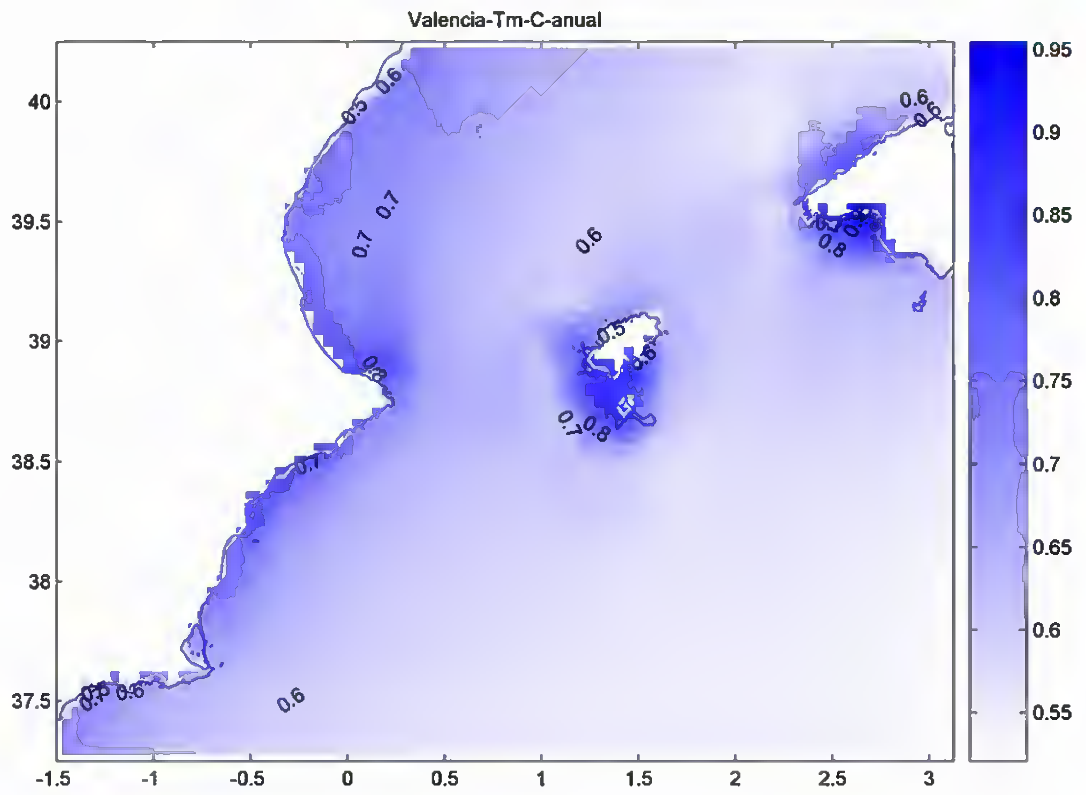


Figura 3.67.  $c(x)$  en la zona de Valencia



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE  
BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

**CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DEL MODELO**

---

## 4. VALIDACIÓN DEL MODELO

### 4.1. Ejemplo de validación

Se ha validado el modelo de calibración para comprobar que las calibraciones realizadas son correctas. Así, a modo de ejemplo se muestran los resultados de validación de  $H_s$  de una zona del Mediterráneo (ver figura 4.1), en la que existen tres boyas de oleaje. Se calibra el régimen medio (ajuste Lognormal entre el 20% y el 99.5% de probabilidad acumulada) y el régimen medio-alto (ajuste Gumbel de máximos entre el 99.5% y el 100% de probabilidad acumulada) de la altura significativa con dos boyas corregidas (Valencia y Cabo de Palos) y se valida con la tercera (Alicante).

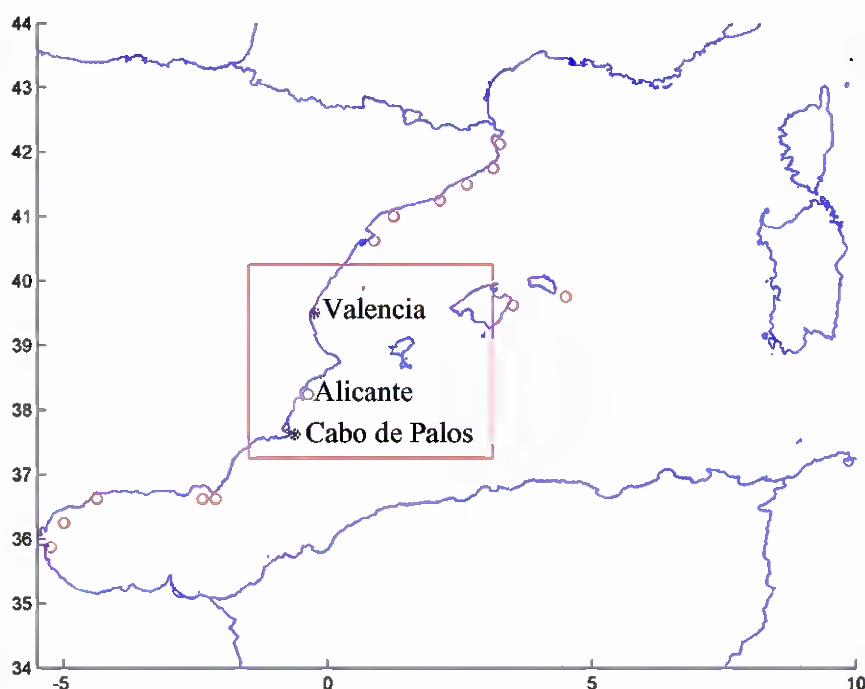


Figura 4.1. Localización de la zona elegida para la validación

Una vez calibrada la zona (con sólo los datos de las dos boyas), se tiene la distribución espacial y temporal de los parámetros calibrados en toda la zona. Por ejemplo, en la figura 4.2 se muestra la distribución espacial de las medias temporales de los parámetros del régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ ). Se calibra, entonces el régimen medio y el régimen medio-alto.



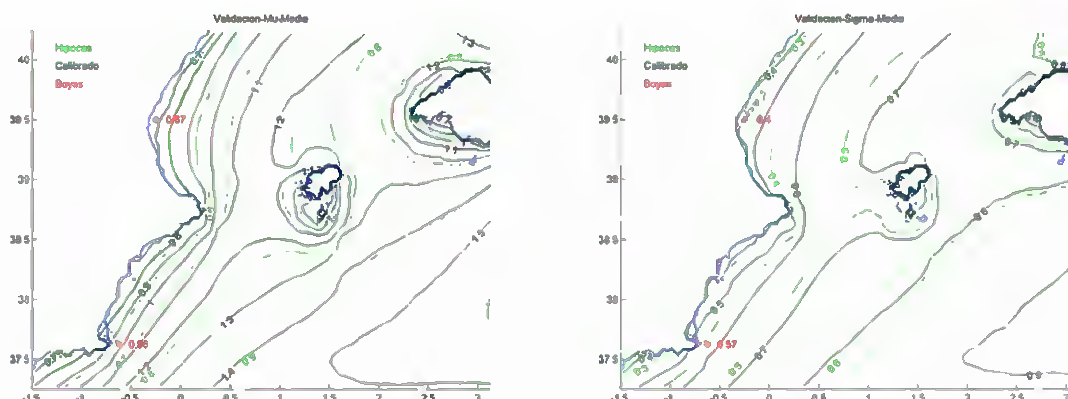


Figura 4.2. Distribución espacial de las medias temporales de los parámetros del régimen medio ( $\mu$  y  $\sigma$ )

Obtenidos los campos de los parámetros calibrados, se buscan los de la posición de la boya de Alicante. En la figura 4.3 se comparan estos parámetros del régimen medio con los hallados de los registros de la boya de Alicante corregida. Tras la calibración, tanto  $\mu$  como  $\sigma$  de HIPOCAS (de la posición de Alicante) se aproximan a lo que registra la Boya de Alicante.

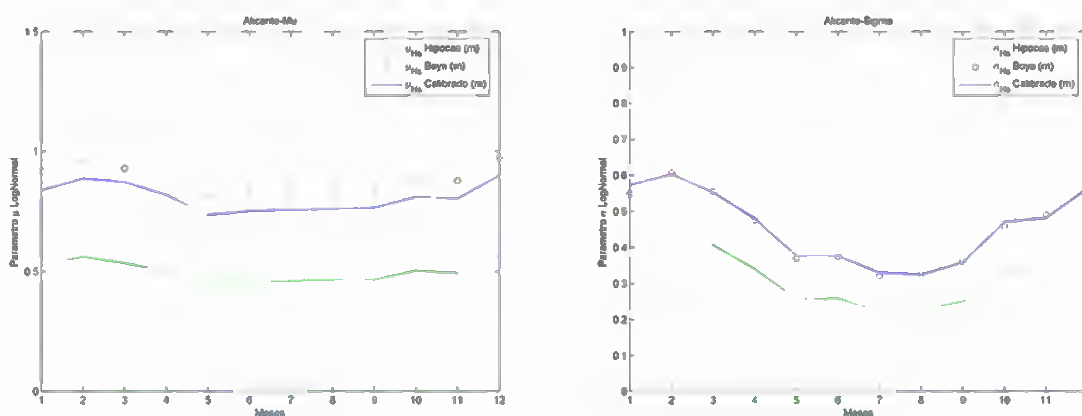


Figura 4.3. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Alicante

En la figura 4.4 se comparan los mismos datos que los representados en la figura 4.3, pero enfrentando los datos de HIPOCAS antes y después de calibrar, con los de la Boya. Con la calibración, se produce un aumento significativo de igualdad entre los datos de HIPOCAS calibrado y la boya. Se recuerda que no se están teniendo en cuenta los datos de la boya de Alicante para calibrar, y se mejoran los ajustes (en el caso de  $\sigma$  de un 60% de correlación a un 99% calibrado).



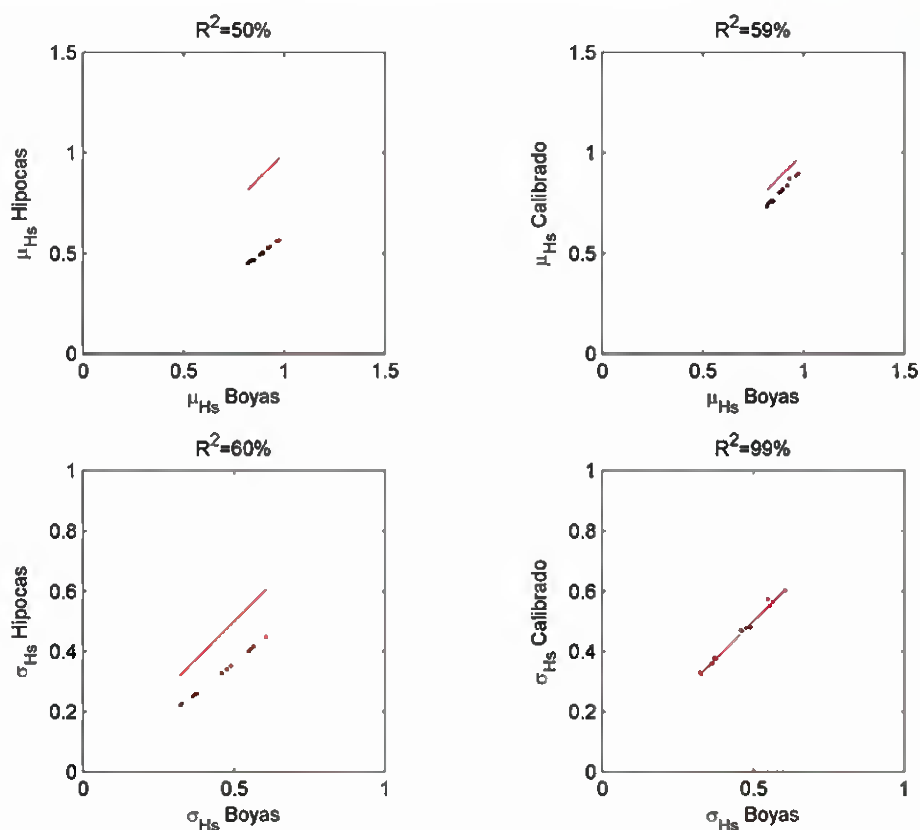


Figura 4.4. Comparación relativa de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$  antes y después de calibrar con los de la boya corregida de Alicante

Una vez calibrado el régimen medio y el régimen medio-alto se recompone la serie de alturas de ola significativa en Alicante. Se compara los cuantiles de la serie de alturas de ola significativa calibradas con los cuantiles de la serie de alturas de ola significativa de la boya corregida de Alicante. En la figura 4.5 se comprueba la bondad del método de calibración, pues prácticamente son idénticas las dos series de altura de ola significativa en términos acumulados (los puntos se sitúan sobre la bisectriz).

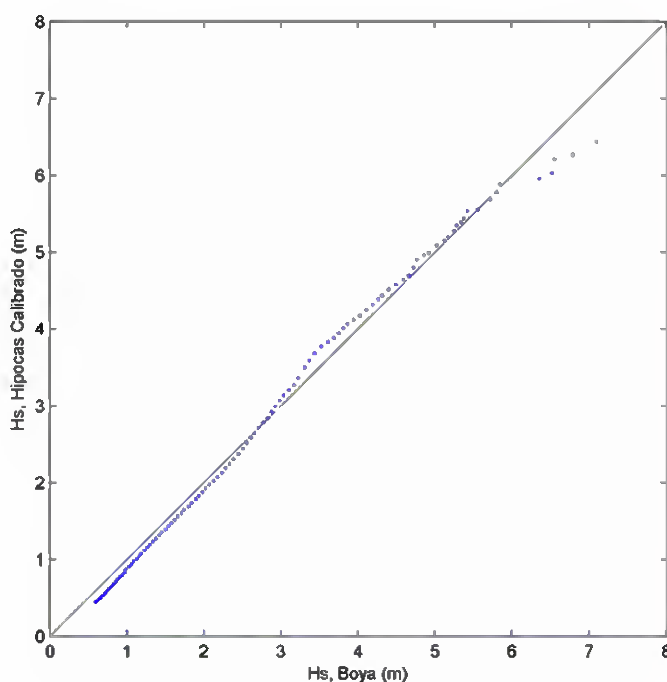


Figura 4.5.  $H_s$  boya corregida de Alicante vs  $H_s$  HIPOCAS calibrado en Alicante

Por otro lado, si se calibra con los datos de las tres boyas de la zona seleccionada, se obtienen valores calibrados de los parámetros del régimen medio muy próximos a los de las boyas que han servido para calibrar HIPOCAS en esa zona. Así, para la posición de la boya de Alicante se tienen unos parámetros calibrados del régimen medio (ver figura 4.6) similares a los obtenidos en la figura 4.3 (calibrados sin la información de la boya de Alicante), pero que se ajustan mejor a la boya.

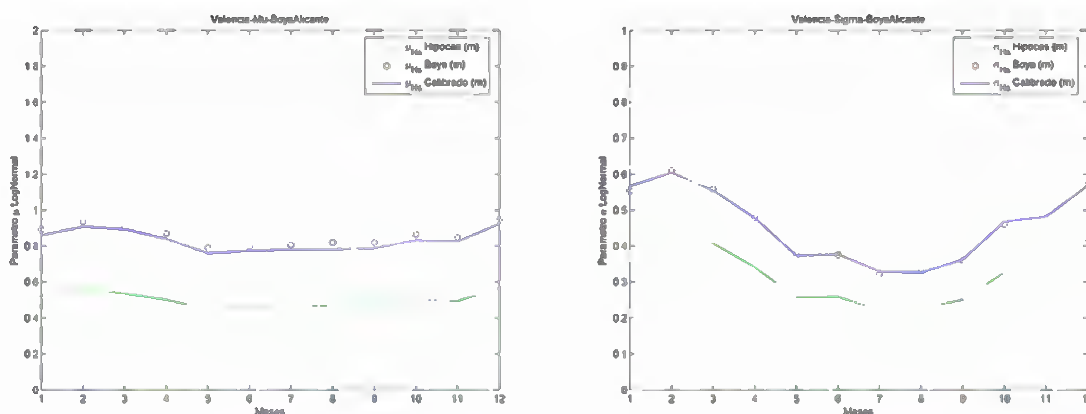


Figura 4.6. Evolución temporal de  $\mu$  y  $\sigma$  en Alicante





Se destaca de este modelo de calibración que los resultados obtenidos en Alicante tanto calibrando con los datos de la boya de Alicante como si se calibra sin tener esos datos en cuenta, se llegan a resultados semejantes. Lógicamente la calibración con un mayor número de boyas permite una definición más correcta de la transformación a realizar, por lo que en este tipo de problemas es conveniente no “despreciar” información en el proceso de validación. Por lo tanto en el proceso de calibración se van a utilizar todas las boyas disponibles.

En las calibraciones de todas las zonas se realizan figuras comparando los parámetros a calibrar de los regímenes de HIPOCAS, antes y después de calibrar, con los de las boyas corregidas. Así se va validando o verificando el método de calibración con su uso y no se reserva información para validarlo a posteriori.

#### **4.2. Verificación del régimen medio en una boya**

Para hacer una verificación de la reproducción de las series temporales de  $H_s$ , se va a comparar la serie temporal que existe en la boya de Mahón con lo que predice HIPOCAS tras la calibración en esa posición. Se va a utilizar Mahón porque es la única boya con series suficientemente largas que está en profundidades indefinidas, por lo tanto no ha sido necesaria su propagación o corrección de los datos, se utilizan los datos originales.

Tras la calibración de la zona de Baleares, se recompone la serie temporal de  $H_s$  en la posición de la boya de Mahón con la transformación potencial en dos tramos de la figura 4.7. Para comparar las series temporales de HIPOCAS en la posición de Mahón y de la boya, se eliminan los datos de los instantes de tiempo que no existen en las dos bases de datos; por lo tanto se puede evaluar las diferencias entre marzo de 1993 y diciembre de 2001 (salvo los huecos de la boya de Mahón).



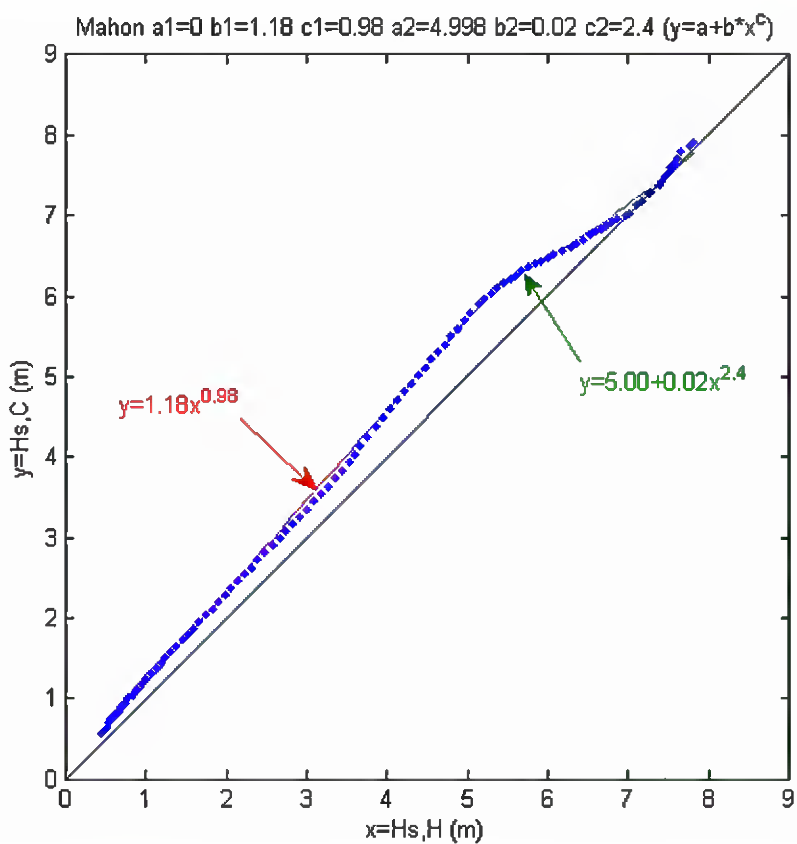


Figura 4.7. Transformación final de la calibración en Mahón

En la figura 4.8 se muestran las tres series temporales de  $H_s$ , de la Boya de Mahón, de HIPOCAS antes de calibrar e HIPOCAS tras la calibración en la posición de Mahón.



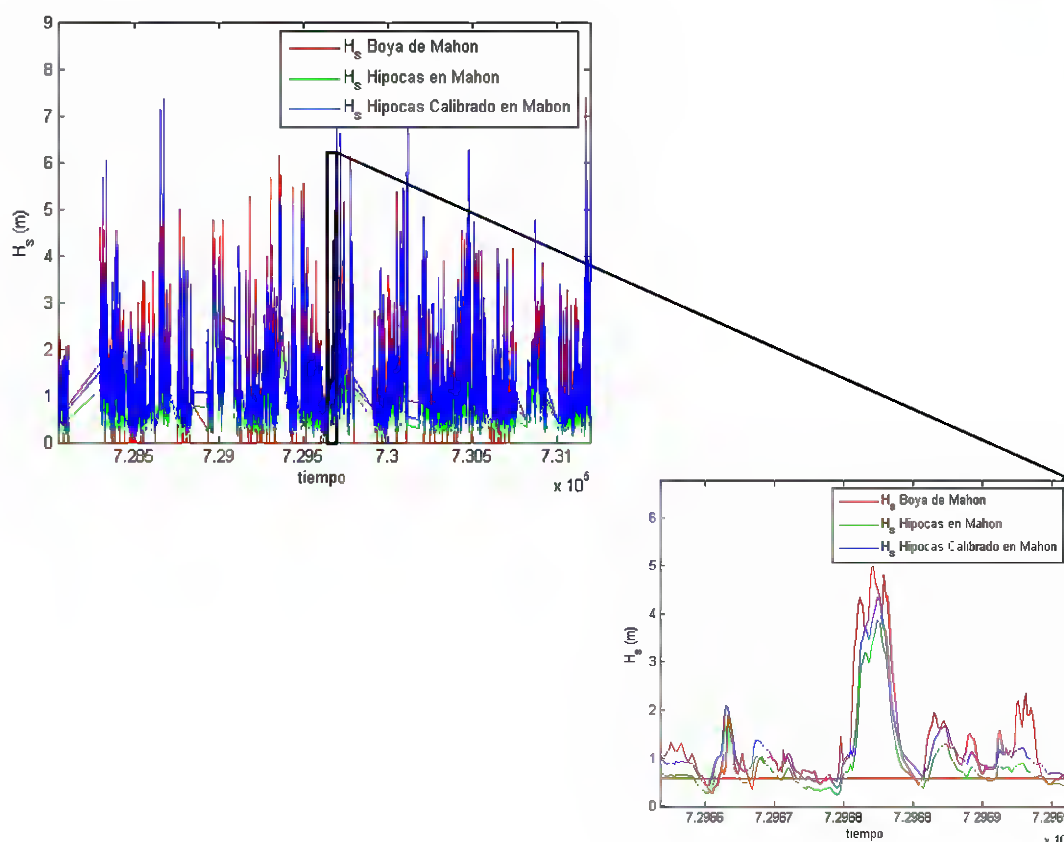


Figura 4.8. Series temporales de  $H_s$  en Mahón

Para una mejor cuantificación de la mejora producida tras la calibración de las series de datos de HIPOCAS, en la posición de Mahón, se comparan dato a dato todos los valores de  $H_s$ , antes y después de calibrar con los suministrados por la boya. En la figura 4.9 se muestra una mejora del 5% de la regresión lineal a la bisectriz. Con la calibración se consigue centrar la nube de puntos. También se comparan los cuantiles de estas series de  $H_s$ , comprobándose la mejora y aproximación a la bisectriz tras la calibración. El perfecto ajuste a la bisectriz indicaría la igualdad probabilística entre las series de datos, es decir, que tanto la boya de Mahón como el punto HIPOCAS calibrado presentan la misma distribución.



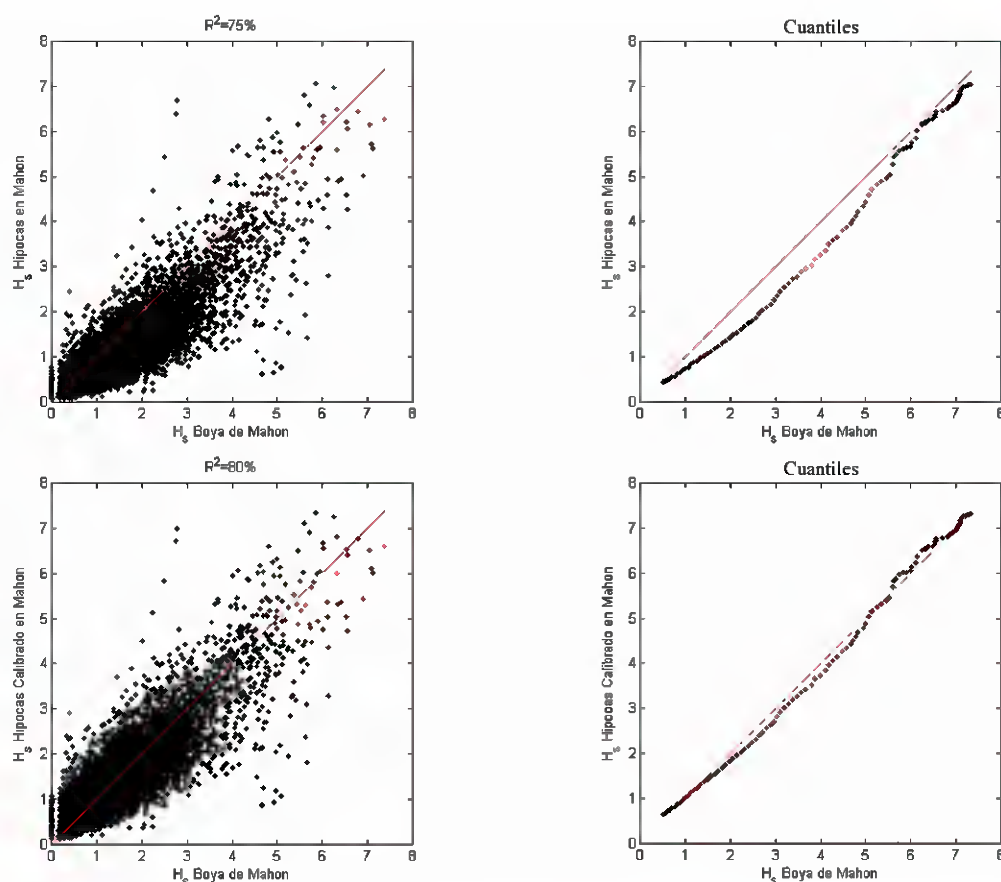


Figura 4.9. Comparación de las series de  $H_s$  en Mahón en términos probabilísticos

### 4.3. Comparación de metodologías de calibración

Como otro tipo de verificación del método de calibración se van a comparar los resultados obtenidos en la boya de Mahón en la calibración presentada en este anejo, con un tipo de calibración usualmente realizada para un punto. Este tipo de calibración no se podría utilizar para los propósitos aquí presentados, pues calibra un solo punto y no puede extrapolarse en el espacio, pero sirve para poder observar la bondad de los resultados obtenidos.

Se calibra los datos de HIPOCAS en la posición de Mahón con los datos de la Boya de Mahón, en los instantes de tiempo que existen registros en ambas bases de datos. Se realiza una regresión lineal por mínimos cuadrados entre la serie de  $H_s$  de HIPOCAS con la de la boya. Con la relación lineal obtenida (ver figura 4.10) se calibra la base de datos de HIPOCAS ( $H_s, c = a + bH_s$ )

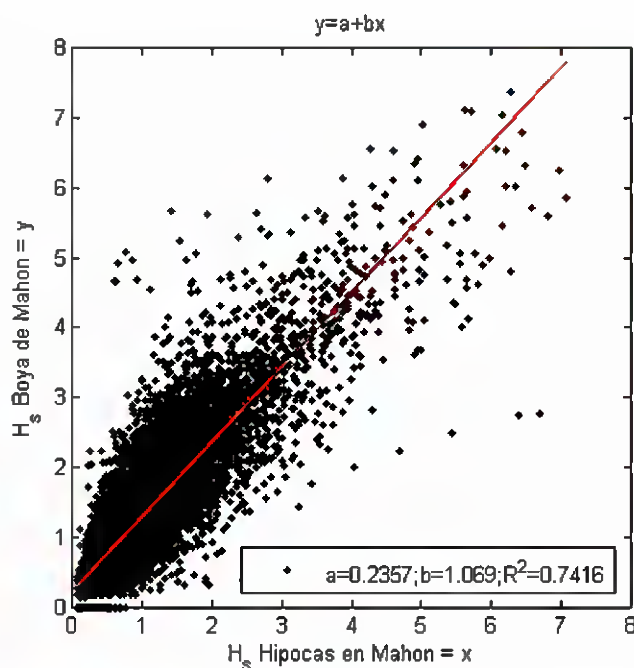


Figura 4.10. Ajuste de la transformación utilizada en la calibración lineal

En la figura 4.11 se dibujan las dos transformaciones de calibración, cuantil a cuantil. La calibración lineal ( $H_s, c = a + bH_s$ ) es la mostrada en la figura 4.10 obtenida a partir de la regresión lineal de los datos. La calibración potencial ( $H_s, c = a + bH_s^c$ ) en dos tramos es la obtenida, en el apartado anterior, en la determinación de los parámetros finales de la calibración (figura 4.7).





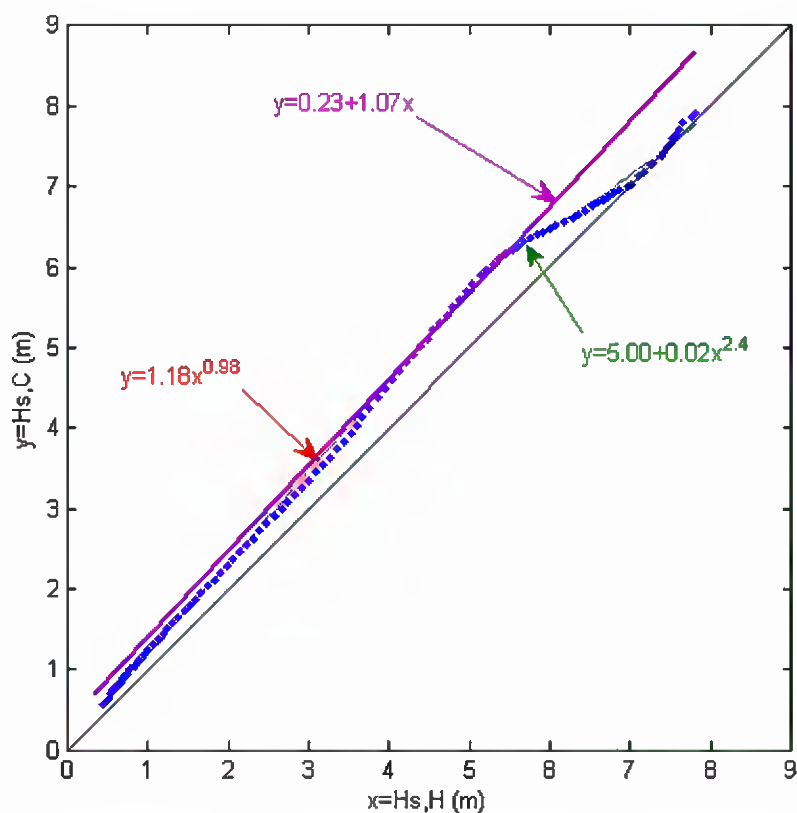


Figura 4.11. Transformaciones de las calibraciones lineal y potencial

Finalmente se comparan, cuantil a cuantil, las dos series calibraciones con la serie de la boya de Mahón. En la figura 4.12 se comprueba como la calibración realizada en este anejo es la que mejor ajusta al régimen de la boya. Con la calibración lineal el ajuste a la bisectriz es peor, sobre todo para los mayores oleajes. La calibración potencial en dos tramos, presentada en este anejo, ajusta muy bien a la bisectriz a lo largo de todas las alturas de ola.



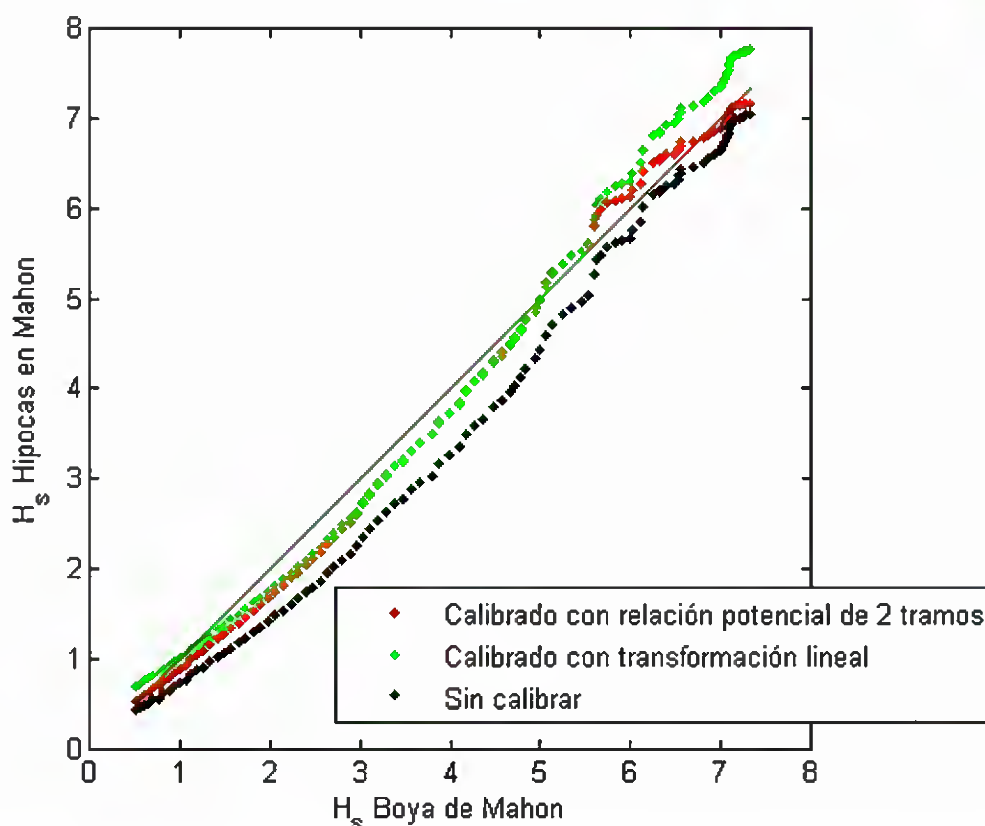


Figura 4.12. Comparación probabilística de calibraciones

Por lo tanto, con esta metodología presentada se consiguen unos resultados mejores que otros sencillos métodos de calibración puntuales, con la gran ventaja de que se calibra toda una zona.

#### 4.4. Verificación del régimen extremal en una boya

Se ha comprobado que, de las series temporales calibradas, se puede extraer otra serie de estadísticos del oleaje. En este apartado simplemente se compara, para la boya de Mahón, y con la calibración expuesta en la figura 4.7 como un parámetro representativo del régimen extremal, se aproxima a lo registrado por la boya tras la calibración.

El método de calibración, aún basado en el régimen medio, logra valores aceptables para el régimen extremal. Así la altura de ola significativa de periodo de retorno de 50 años, en la boya de Mahón es de 7.43 m. HIPOCAS, tras la calibración, en ese mismo intervalo de tiempo, predice una altura de ola significativa de periodo de retorno de 50 años de 7.19 m para la posición de Mahón (Calculado con la función generalizada de extremos, GEV (SMITH, 2003)).



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA

ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

---



ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE  
BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

**CAPÍTULO 5. RESULTADOS**

---



## 5. RESULTADOS

### 5.1. Introducción

En este capítulo se van a presentar los resultados de la calibración espacial en todo el litoral español. Las calibraciones se han realizado por zonas, por lo tanto aquí se van a organizar los resultados según esas zonas que han sido descritas en la tabla 2.5, en concreto serán las denominadas “Andalucía”, “Balears”, “Cataluna” y “Valencia” en el mar Mediterráneo y “Cantabro”, “Galicia”, “Cadiz” y “Canarias” en el océano Atlántico.

Para cada zona se representan los resultados de la calibración tanto de  $H_s$  como de  $T_m$ . Los resultados finales de la calibración se representan con los parámetros finales de la calibración ( $b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$ ) en las distintas zonas, tanto para  $H_s$  y como para  $T_m$ . Esta metodología de calibración es la que se ha seguido para la calibración de todas las variables geofísicas de clima marítimo con las que se ha trabajado en este trabajo. Siendo, por ejemplo, la calibración de  $H_s$ :

$$H_{s,c}(\mathbf{x},t) = b(\mathbf{x})H_s(\mathbf{x},t)^{c(\mathbf{x})}$$

con:

$H_{s,c}(\mathbf{x},t)$  es la serie temporal calibrada de  $H_s$

$H_s(\mathbf{x},t)$  es la serie temporal de  $H_s$  sin calibrar

$b(\mathbf{x})$  y  $c(\mathbf{x})$  son los parámetros finales de la calibración de  $H_s$

La calibración de  $T_m$ , que a continuación se presenta, también sigue la misma formulación.



## 5.2. Zona "Andalucía"

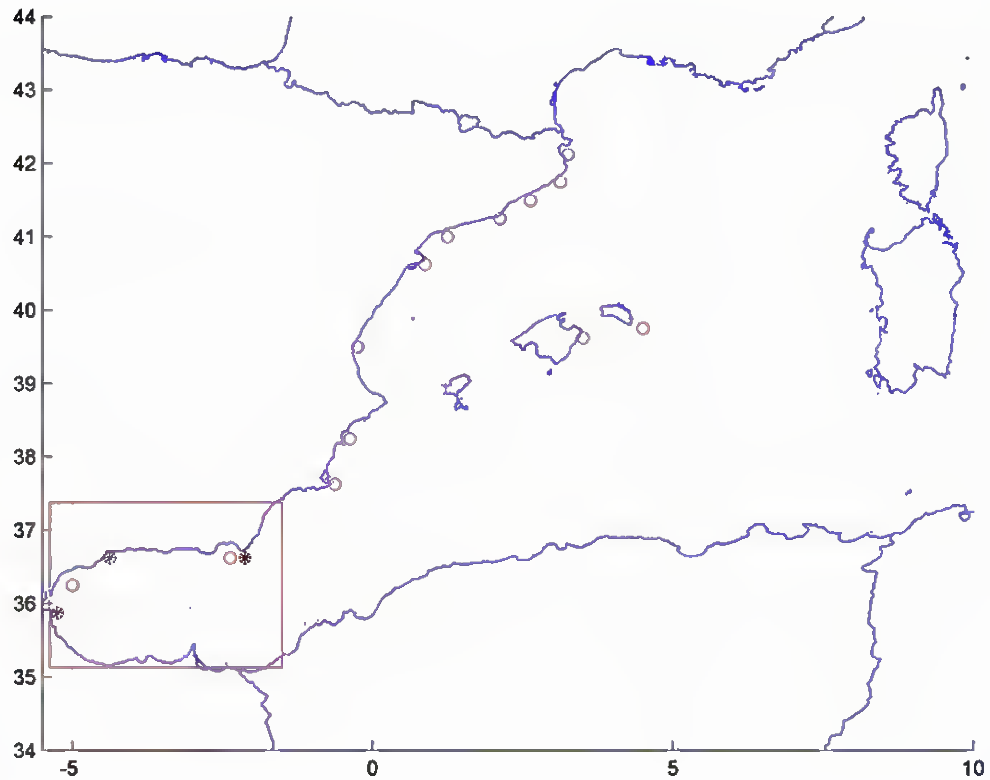


Figura 5.1. Localización de la zona de "Andalucía" y boyas utilizadas para su calibración



### 5.2.1. Calibración de $H_s$

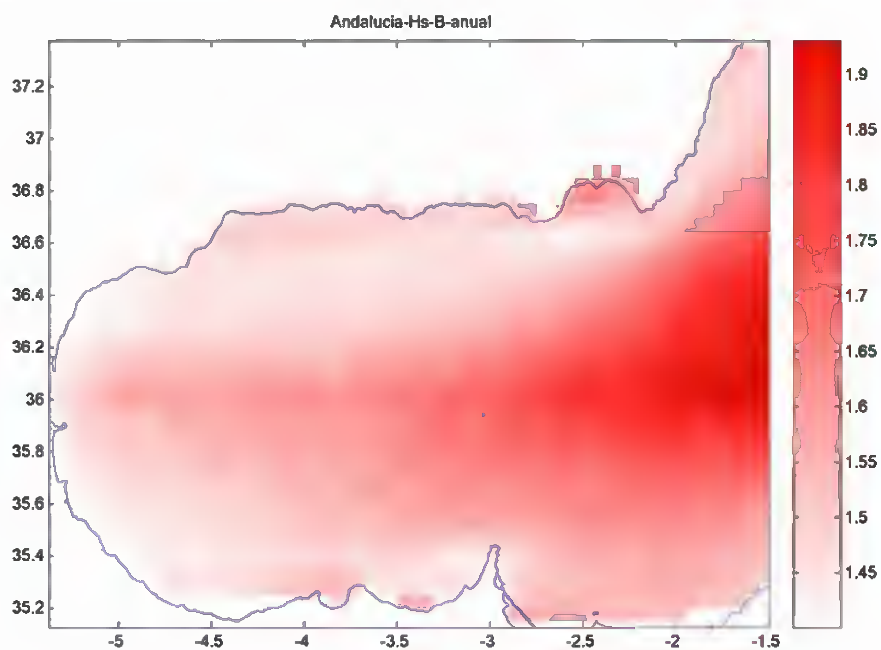


Figura 5.2. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

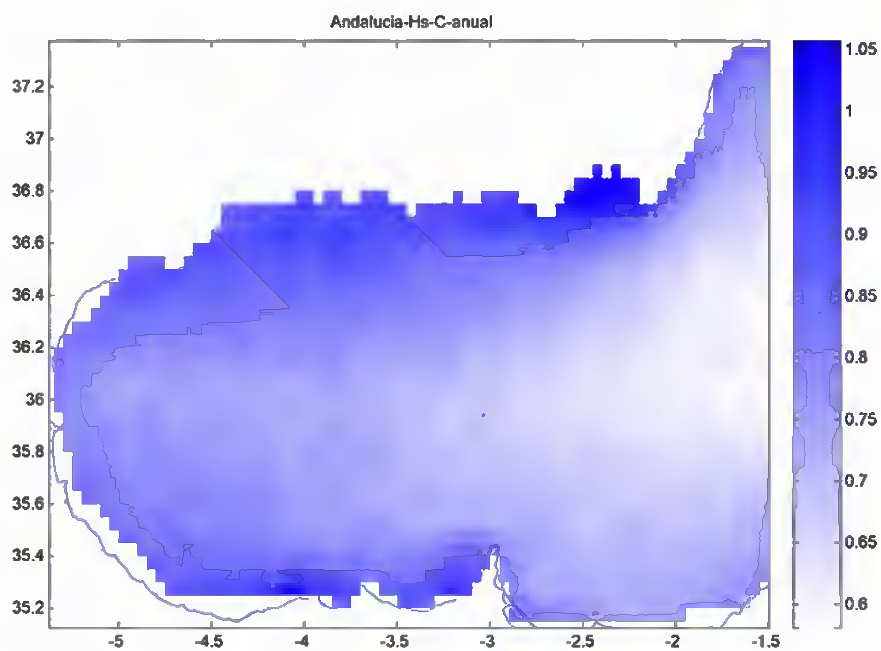


Figura 5.3. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



### 5.2.2. Calibración de $T_m$

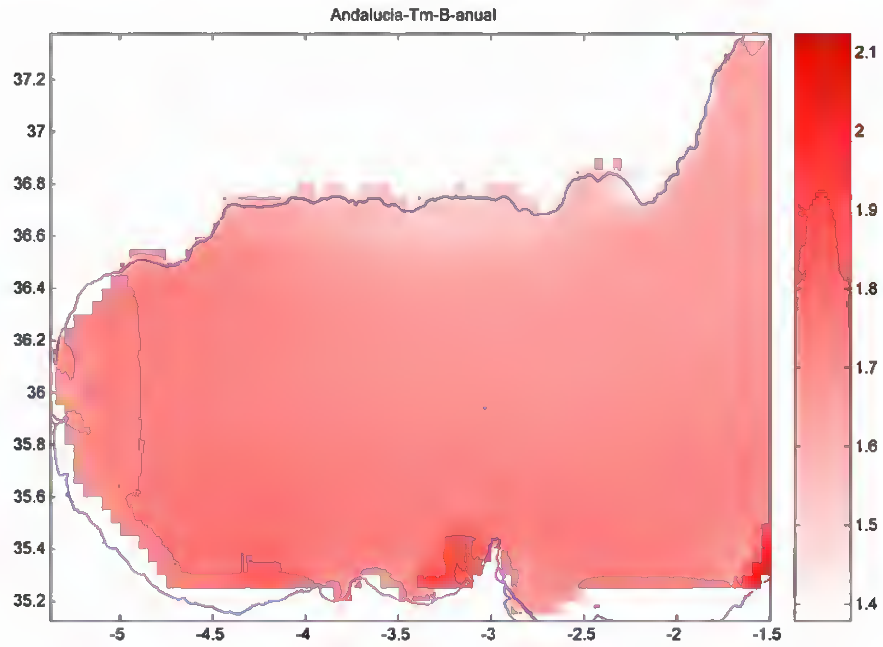


Figura 5.4. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

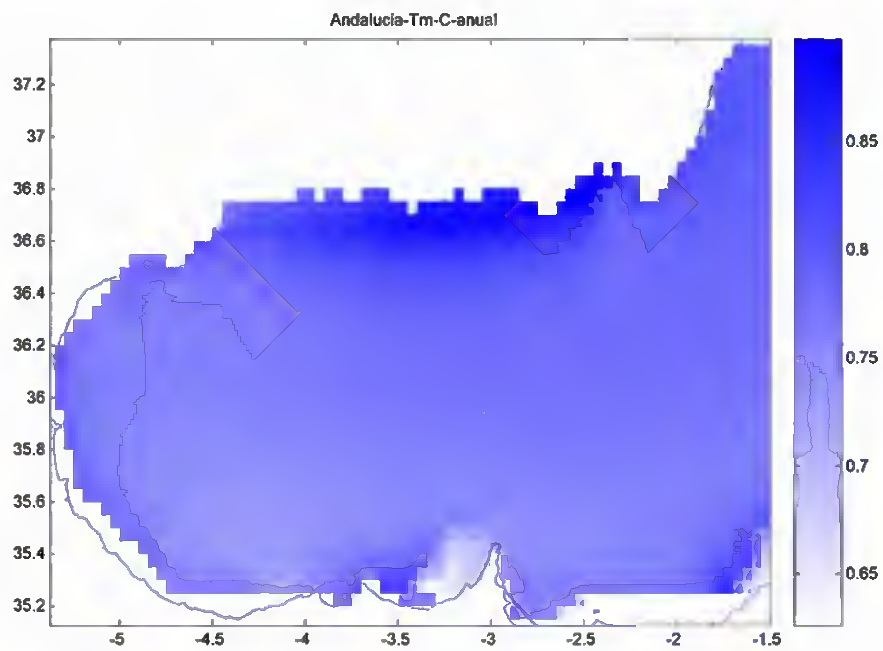


Figura 5.5. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$

### 5.3. Zona "Baleares"

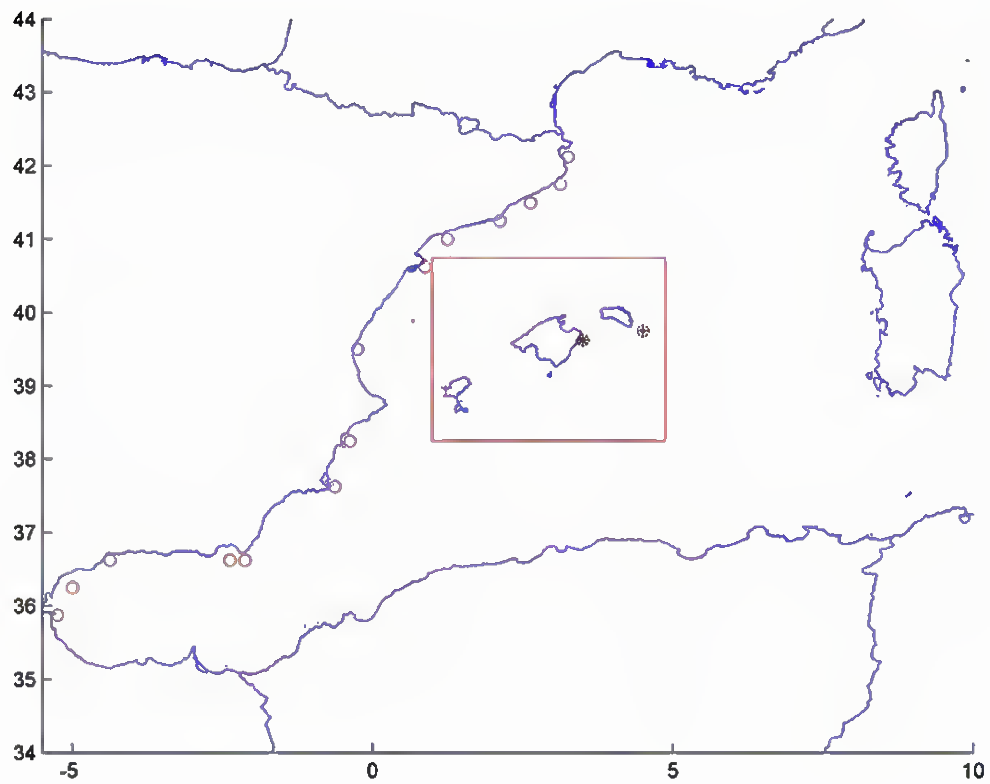


Figura 5.6. Localización de la zona de "Baleares" y boyas utilizadas para su calibración



### 5.3.1. Calibración de $H_s$

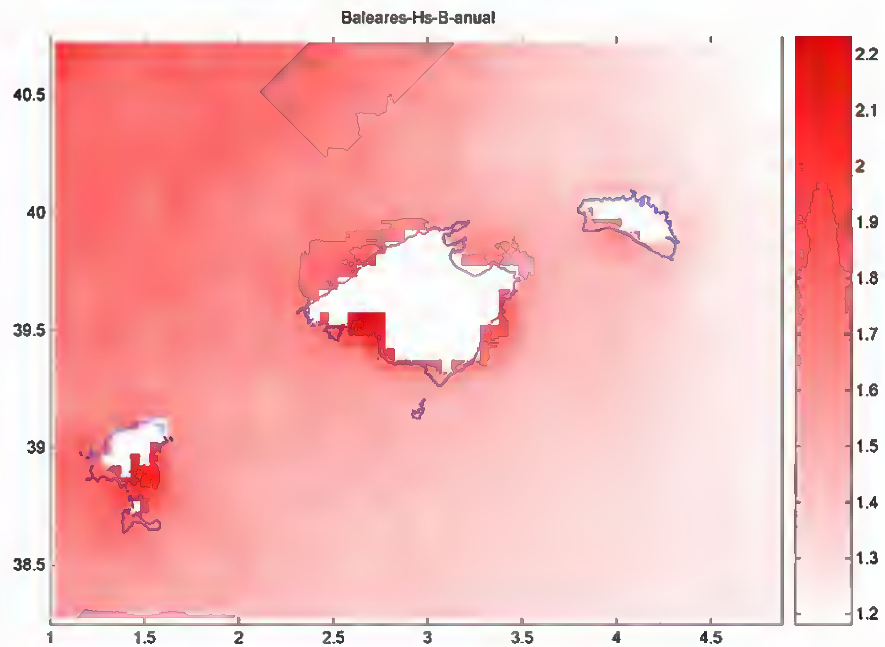


Figura 5.7. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

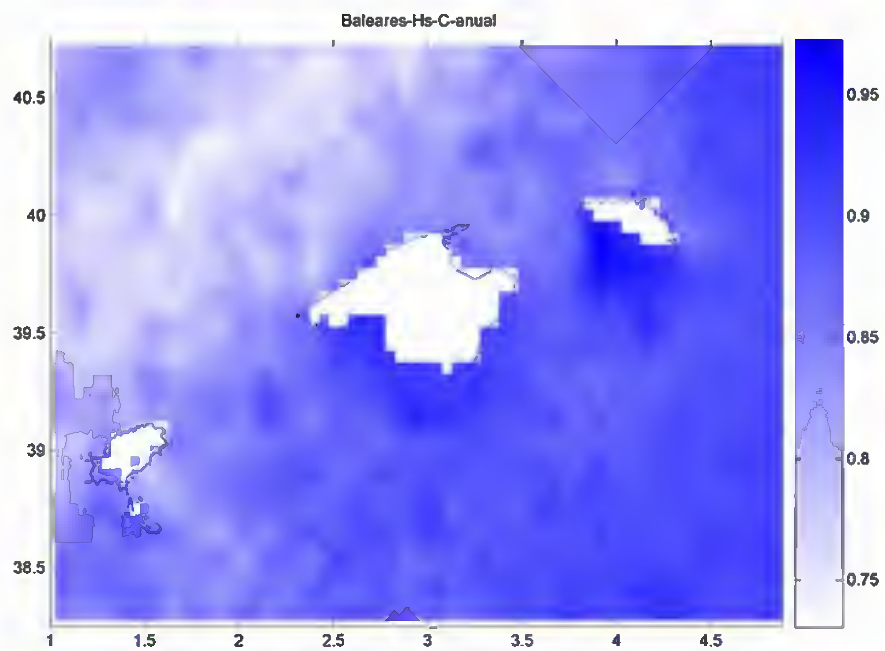


Figura 5.8. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



### 5.3.2. Calibración de $T_m$

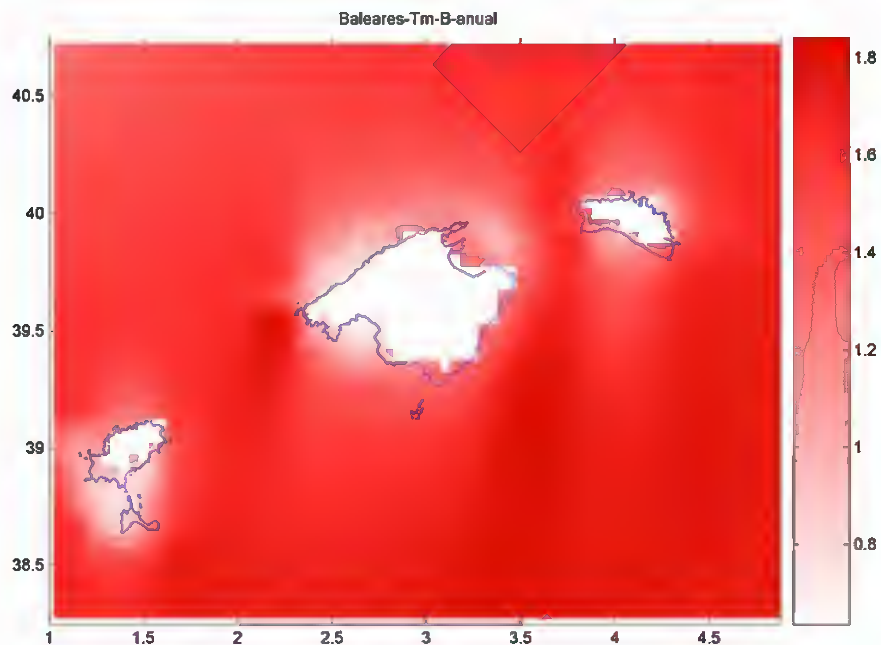


Figura 5.9. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

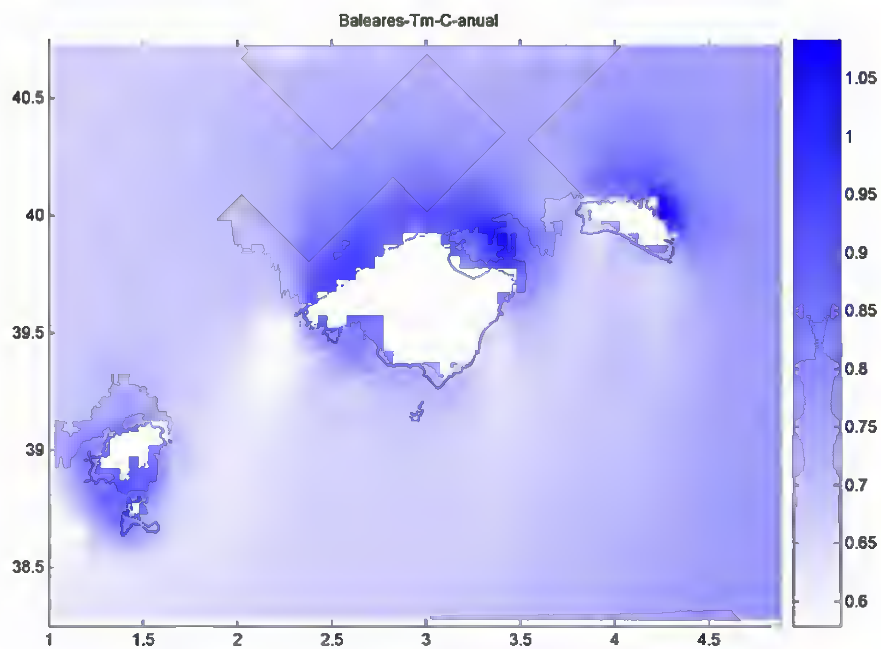


Figura 5.10. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



## 5.4. Zona "Cataluna"

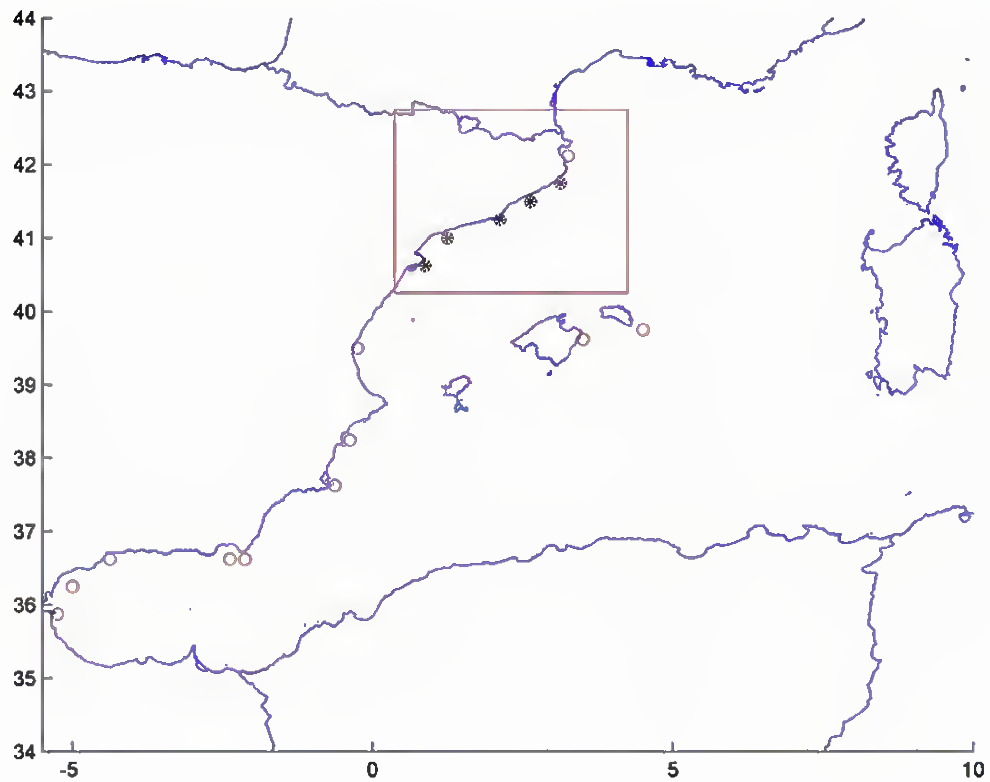


Figura 5.11. Localización de la zona de "Cataluna" y boyas utilizadas para su calibración

### 5.4.1. Calibración de $H_s$

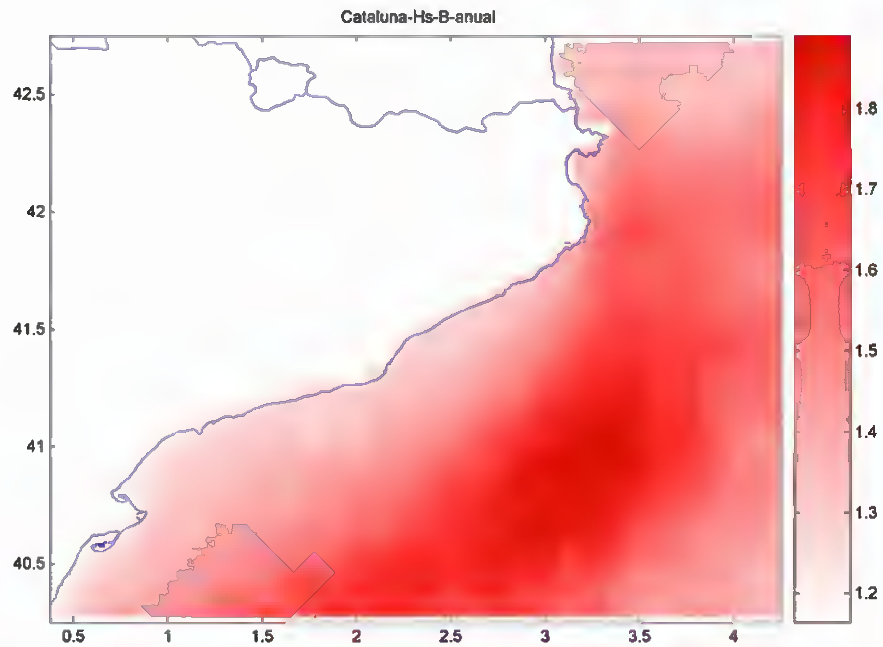


Figura 5.12. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

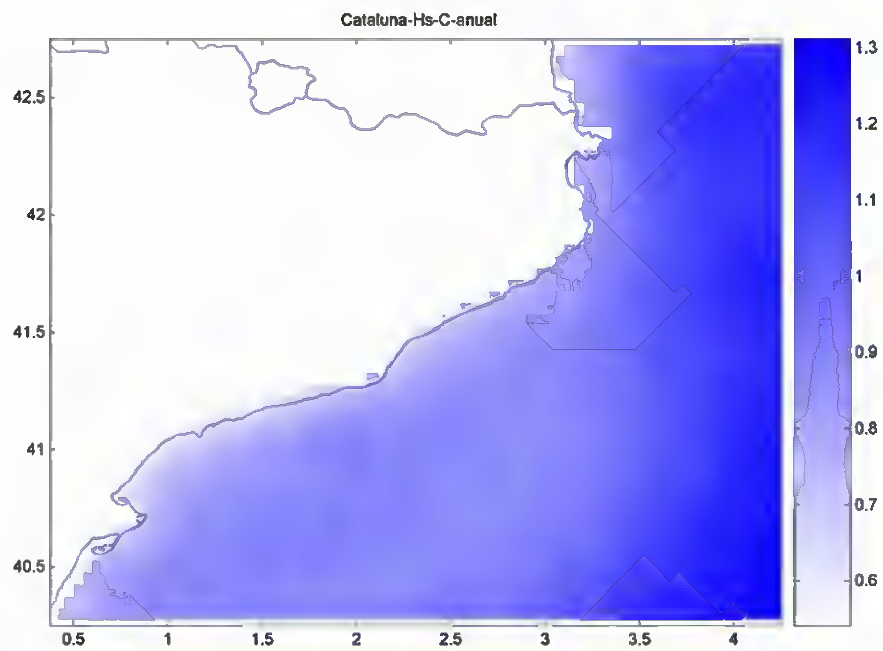


Figura 5.13. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$

### 5.4.2. Calibración de $T_m$

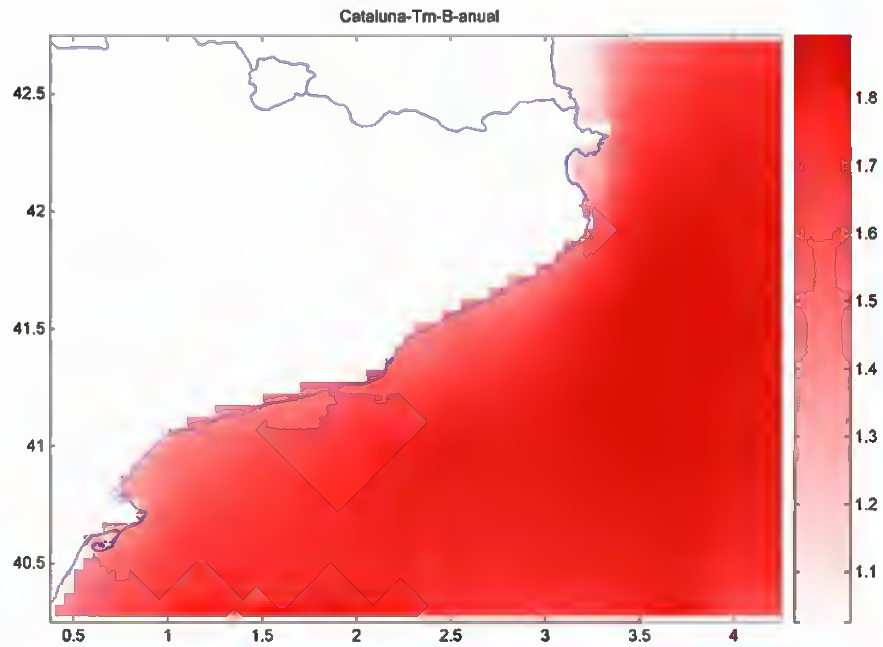


Figura 5.14. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

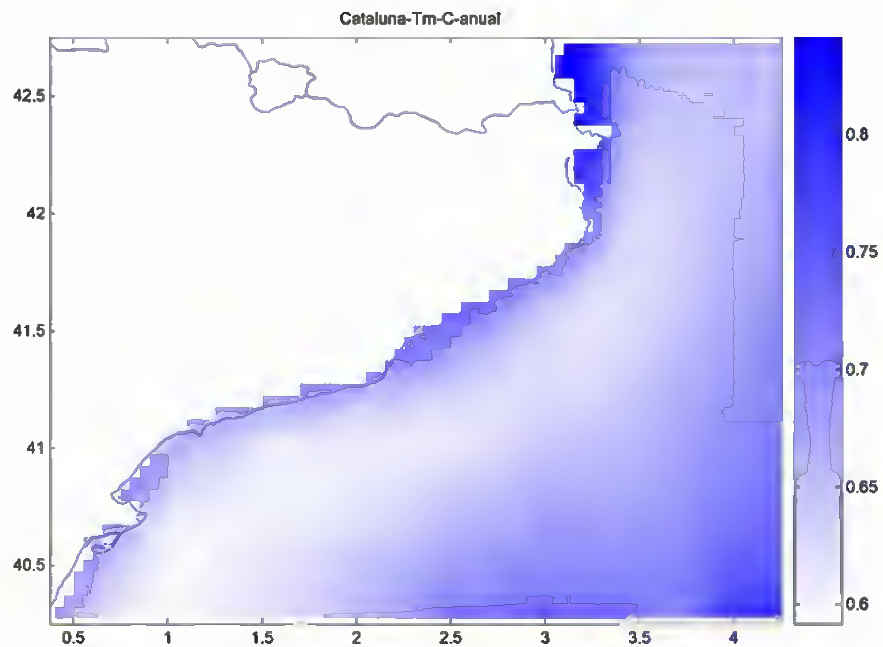


Figura 5.15. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$

## 5.5. Zona "Valencia"

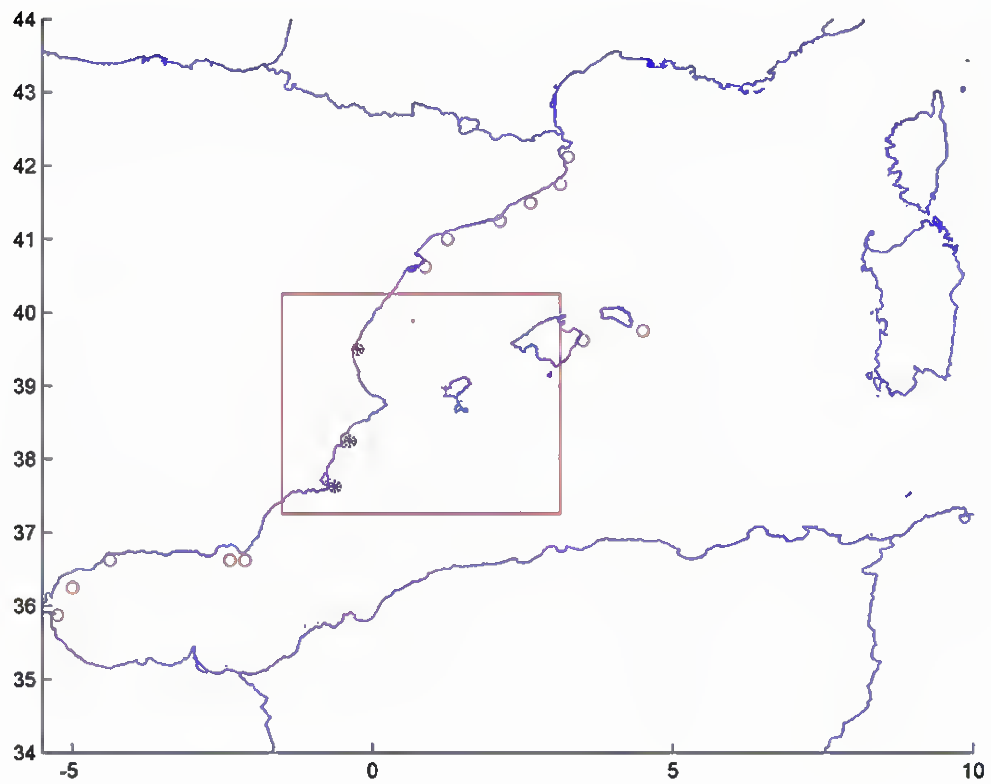


Figura 5.16. Localización de la zona de "Valencia" y boyas utilizadas para su calibración

### 5.5.1. Calibración de $H_s$

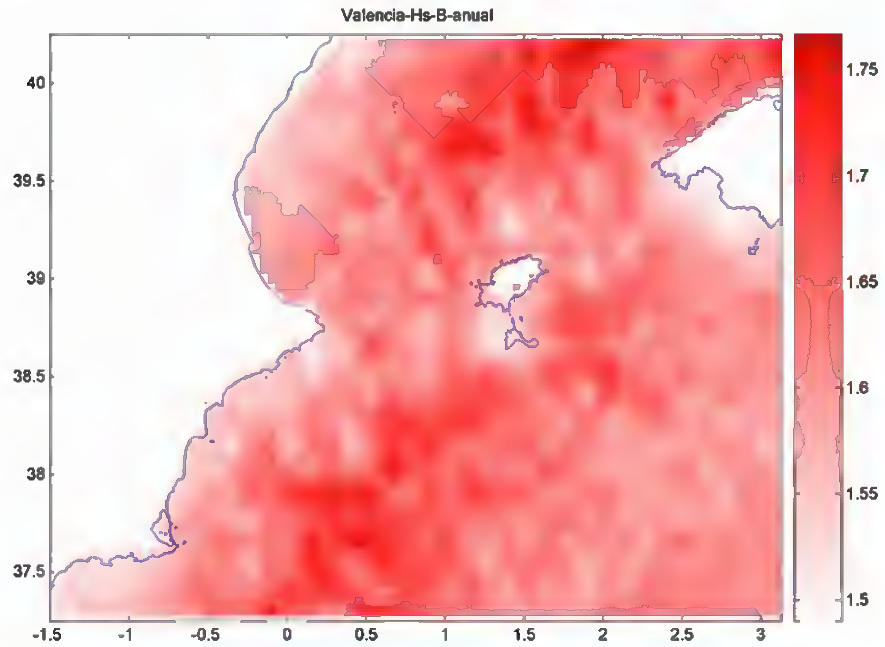


Figura 5.17. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

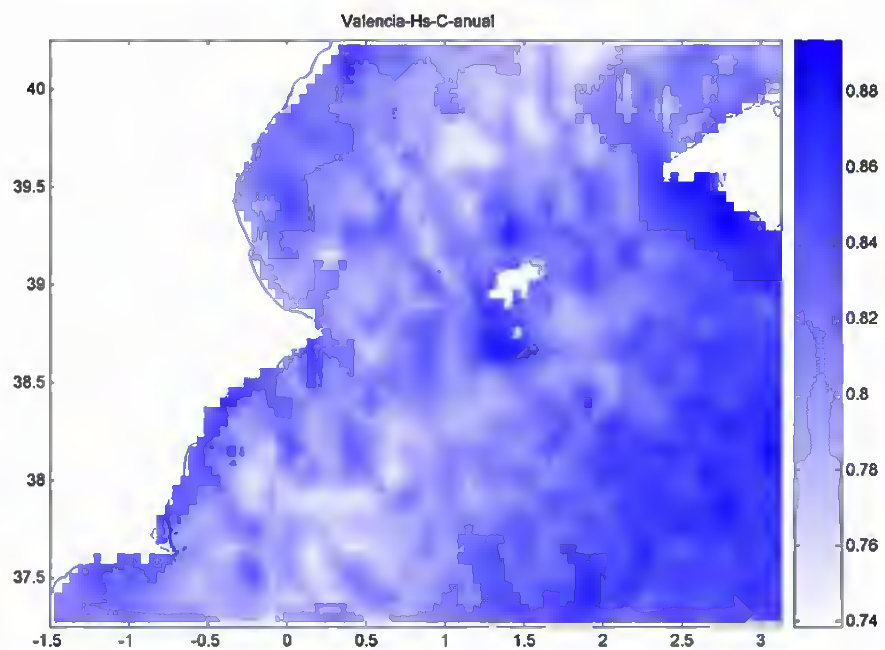


Figura 5.18. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$

### 5.5.2. Calibración de $T_m$

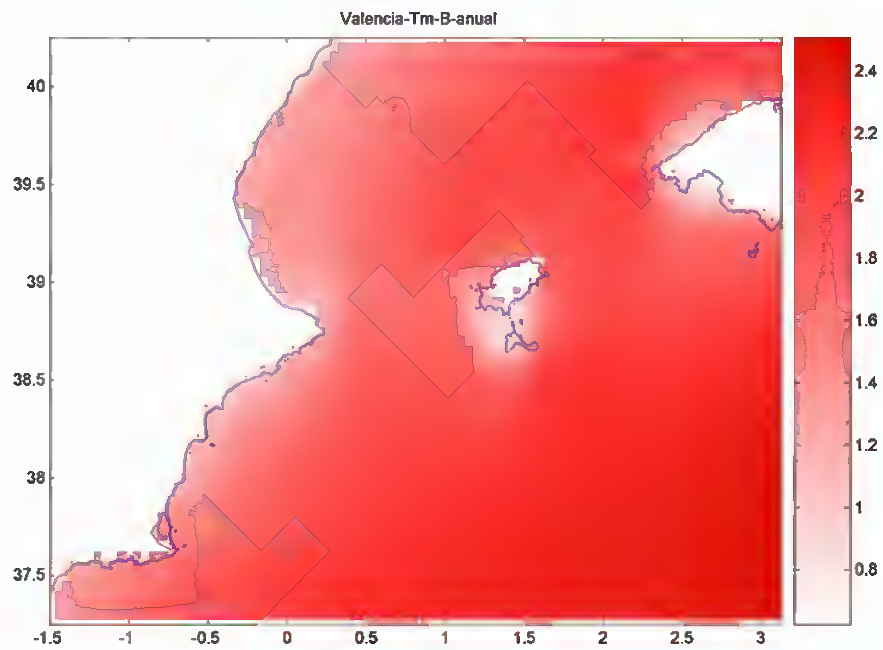


Figura 5.19. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

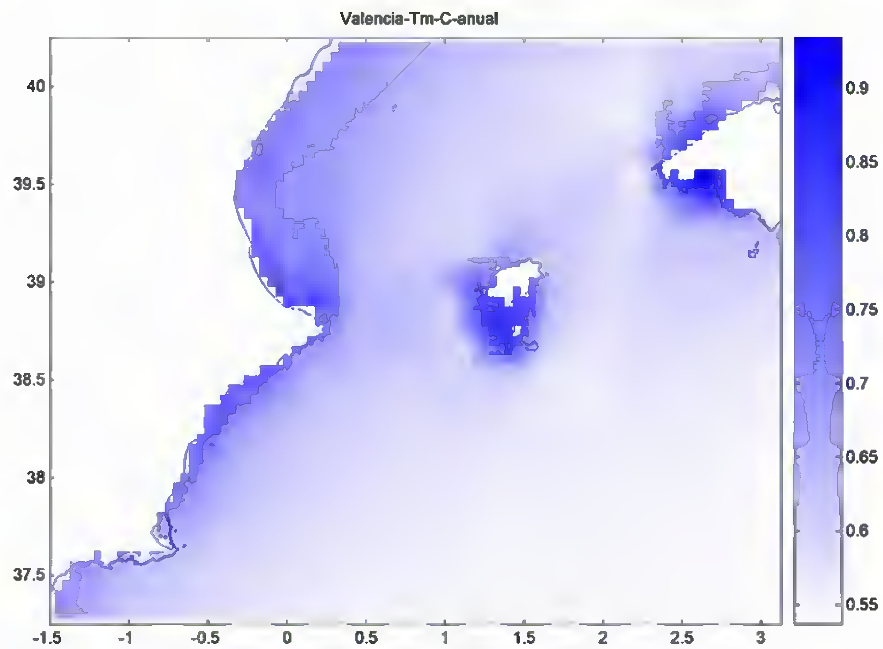


Figura 5.20. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$





## 5.6. Zona "Cantabrico"

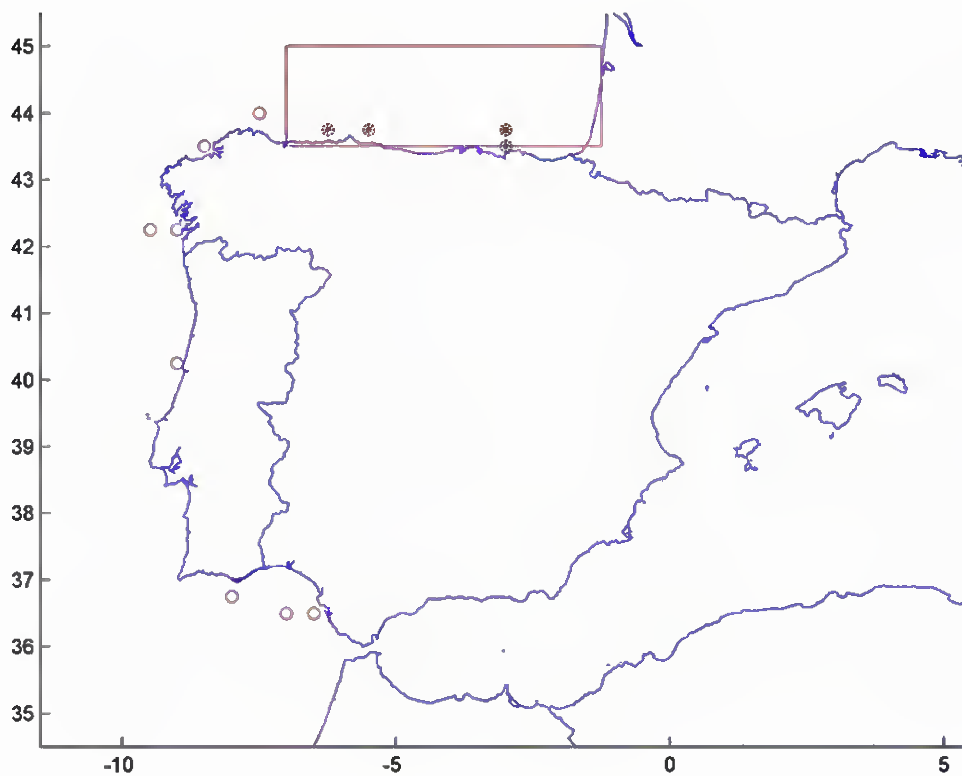


Figura 5.21. Localización de la zona de "Cantabrico" y boyas utilizadas para su calibración



### 5.6.1. Calibración de $H_s$

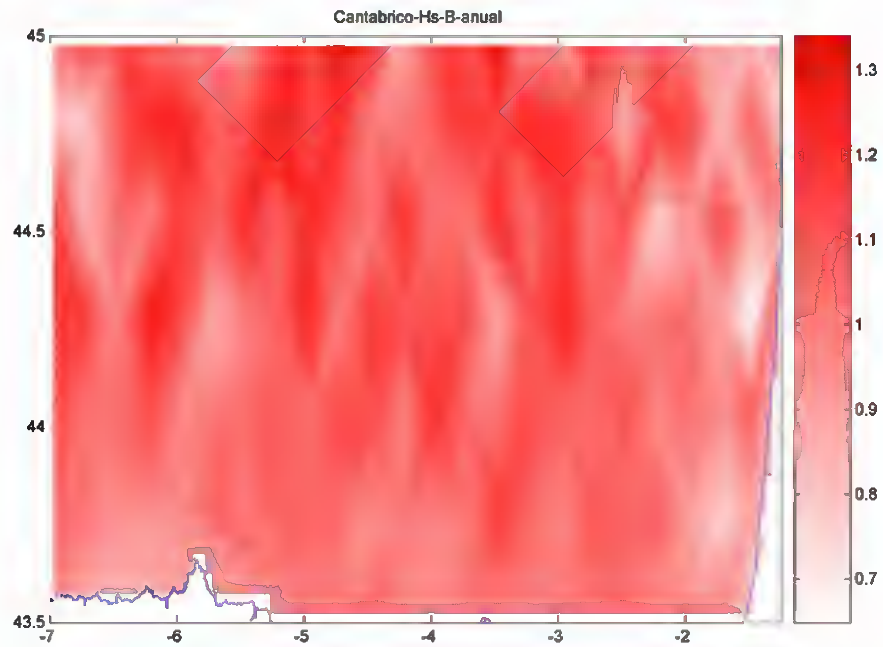


Figura 5.22. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

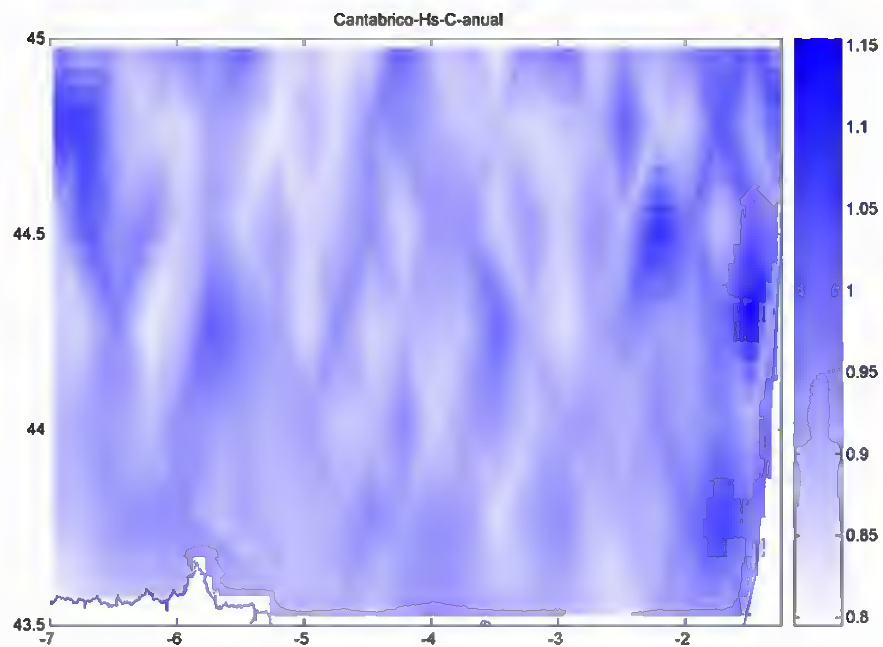


Figura 5.23. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



### 5.6.2. Calibración de $T_m$

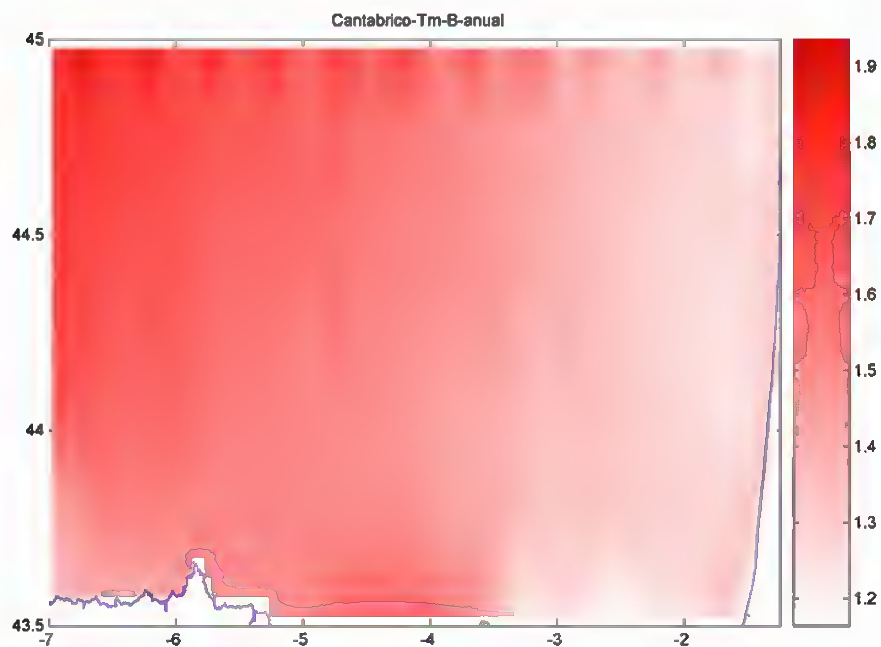


Figura 5.24. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

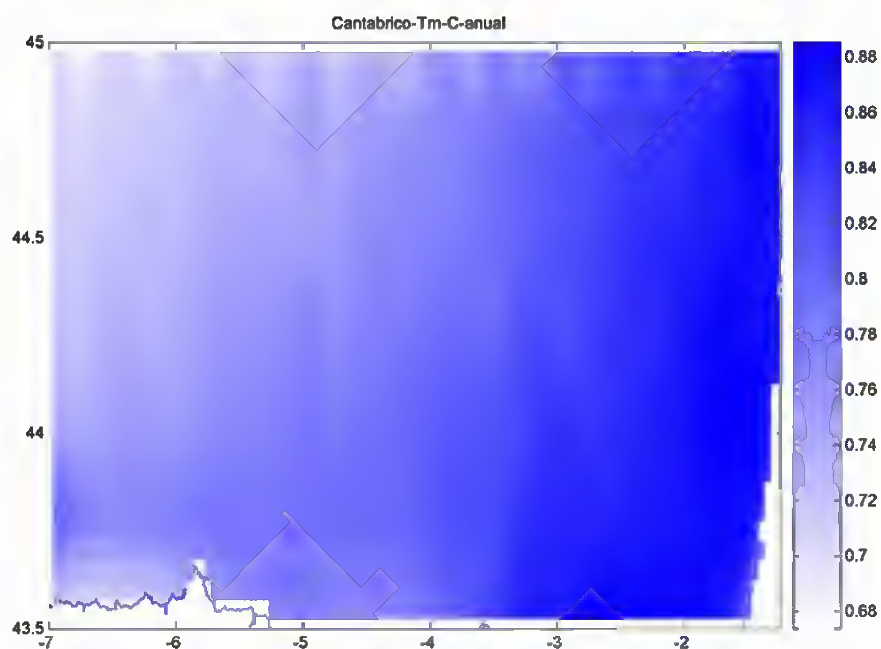


Figura 5.25. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



## 5.7. Zona "Galicia"

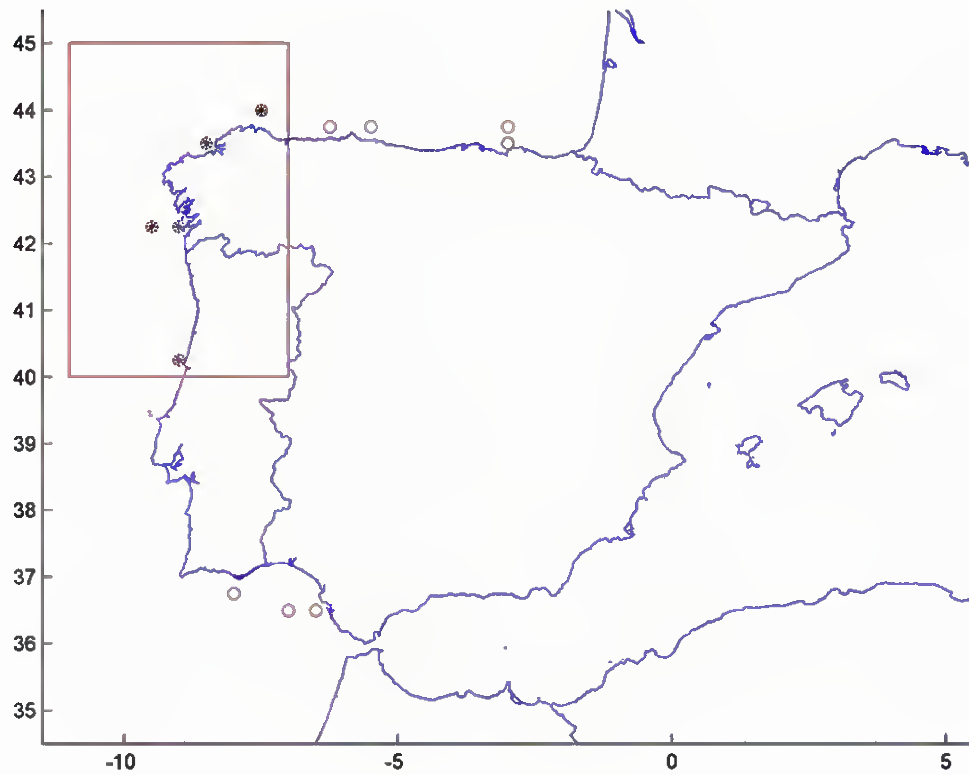


Figura 5.26. Localización de la zona de "Galicia" y boyas utilizadas para su calibración



### 5.7.1. Calibración de $H_s$

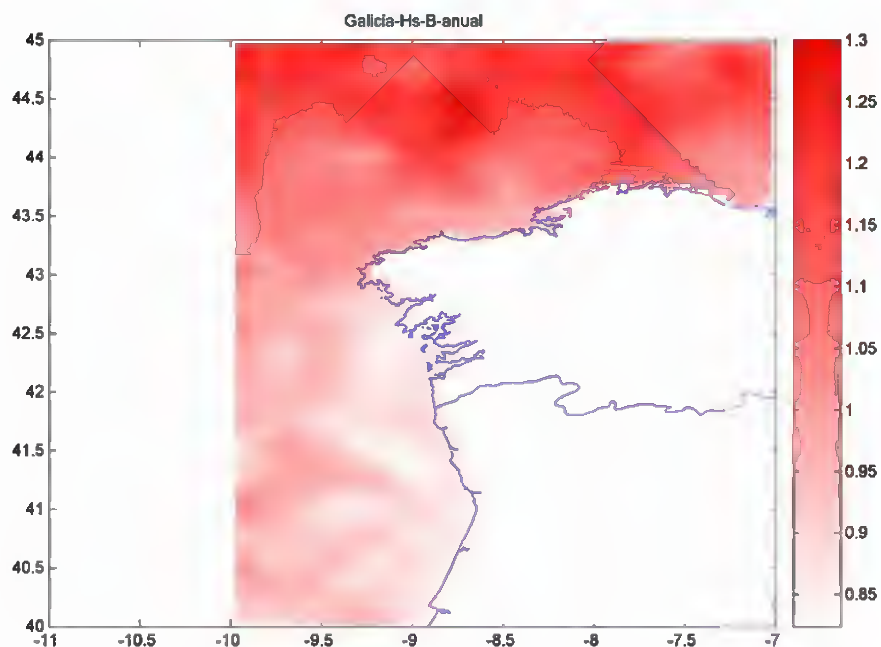


Figura 5.27. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

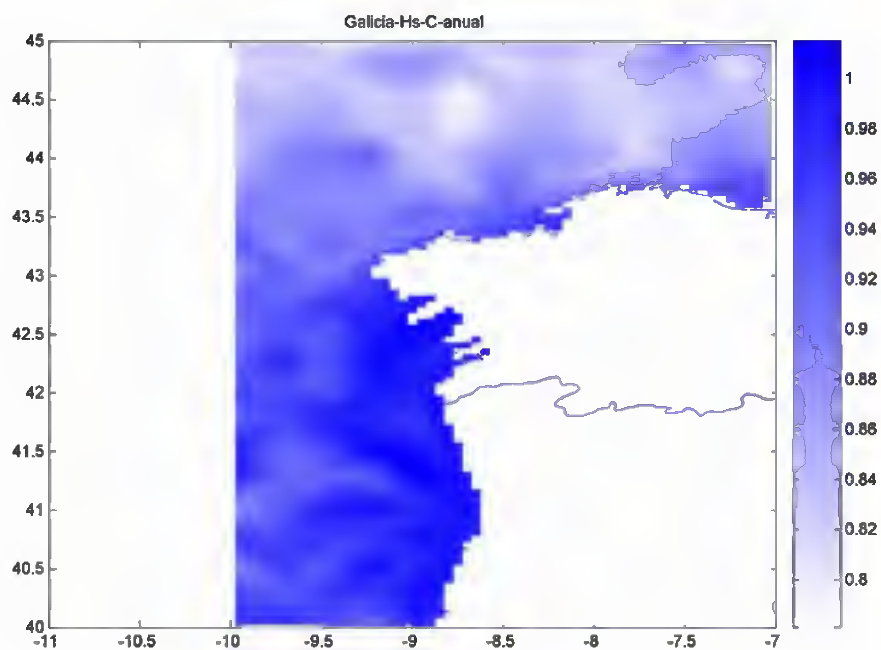


Figura 5.28. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$





### 5.7.2. Calibración de $T_m$

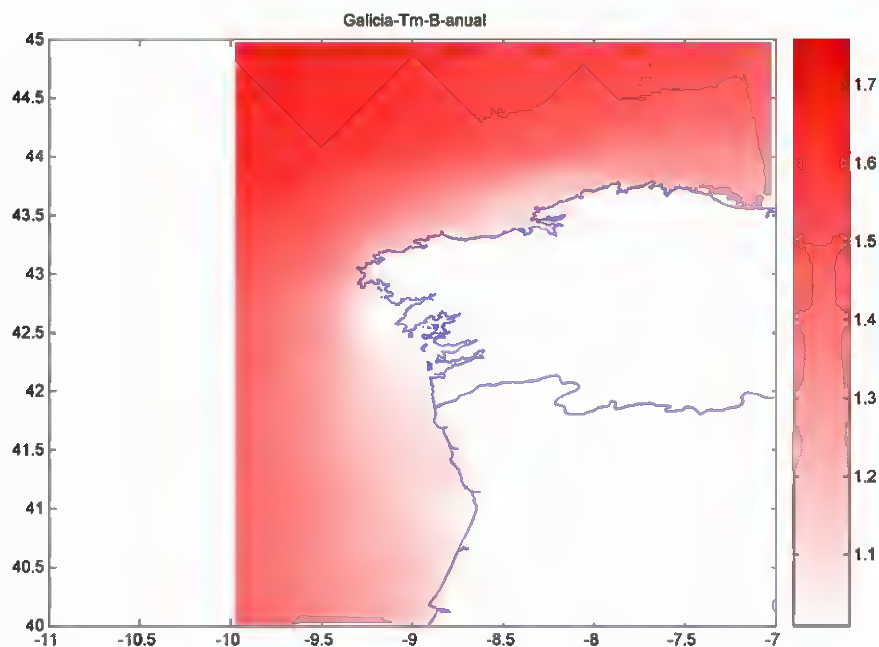


Figura 5.29. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

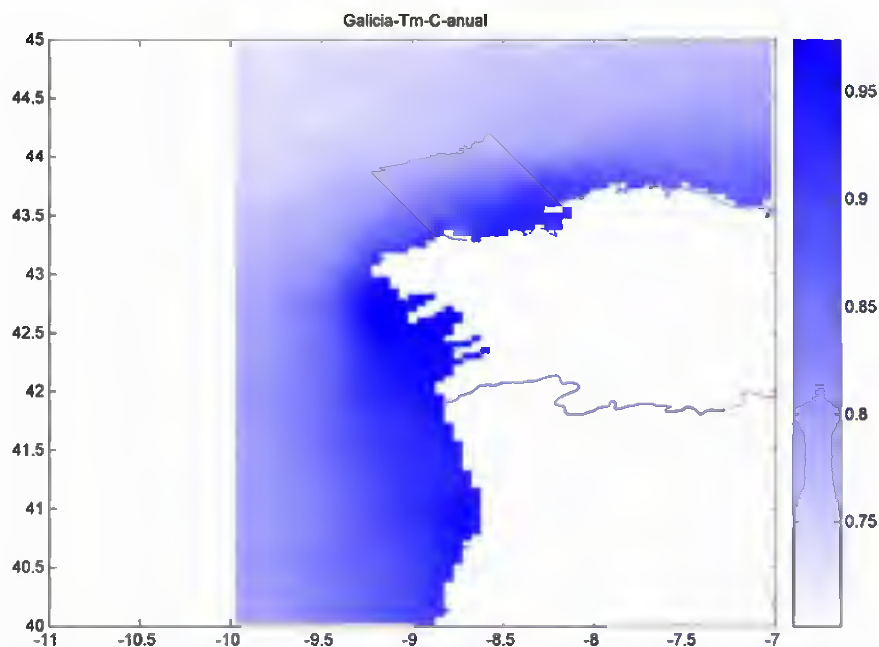


Figura 5.30. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



## 5.8. Zona "Cadiz"

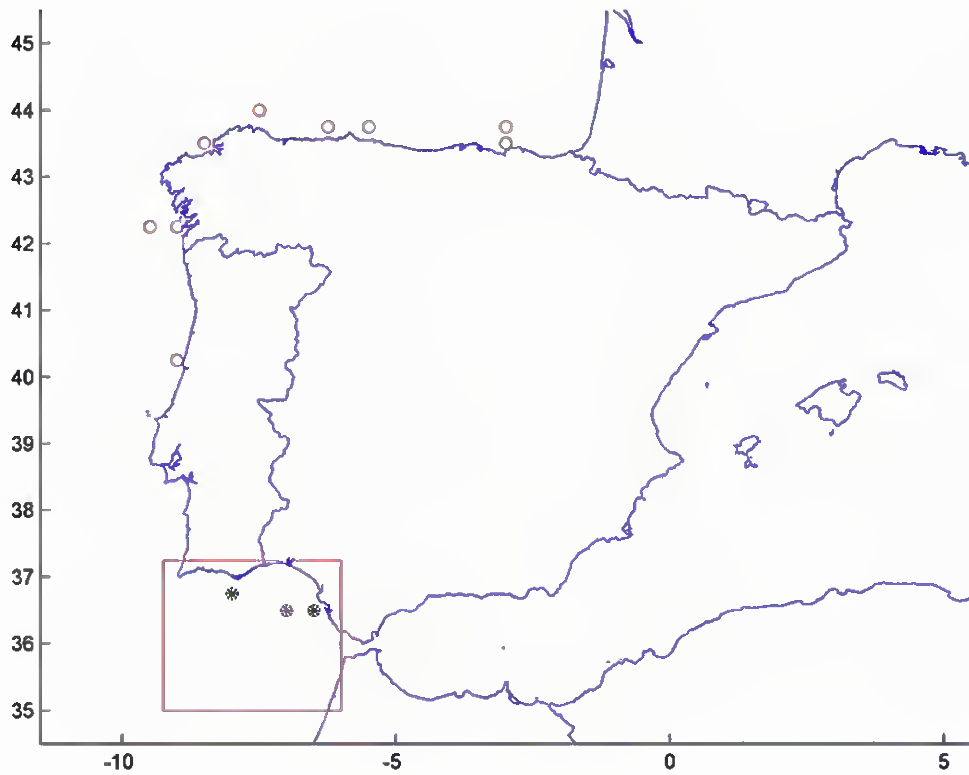


Figura 5.31. Localización de la zona de "Cadiz" y boyas utilizadas para su calibración

### 5.8.1. Calibración de $H_s$

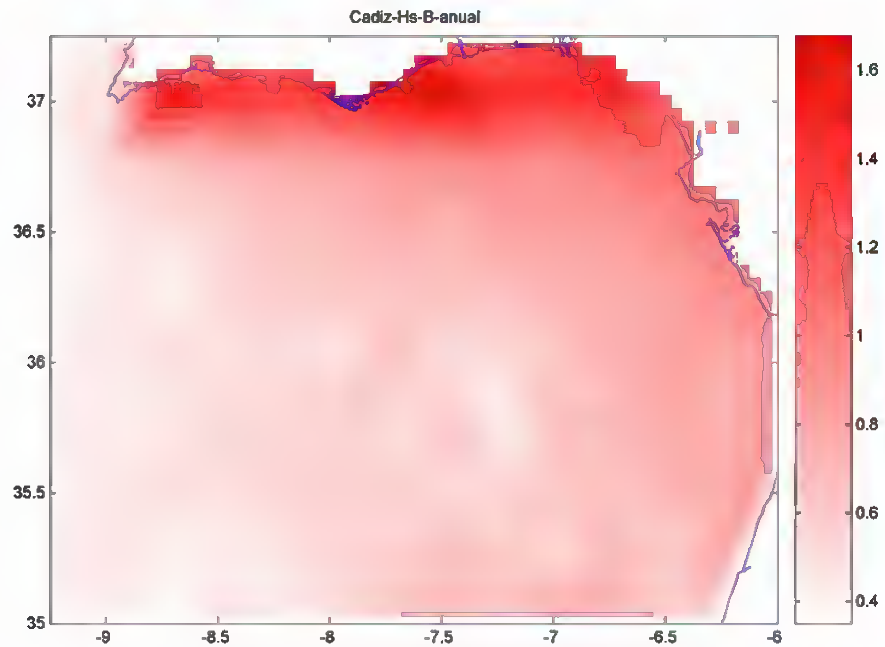


Figura 5.32. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

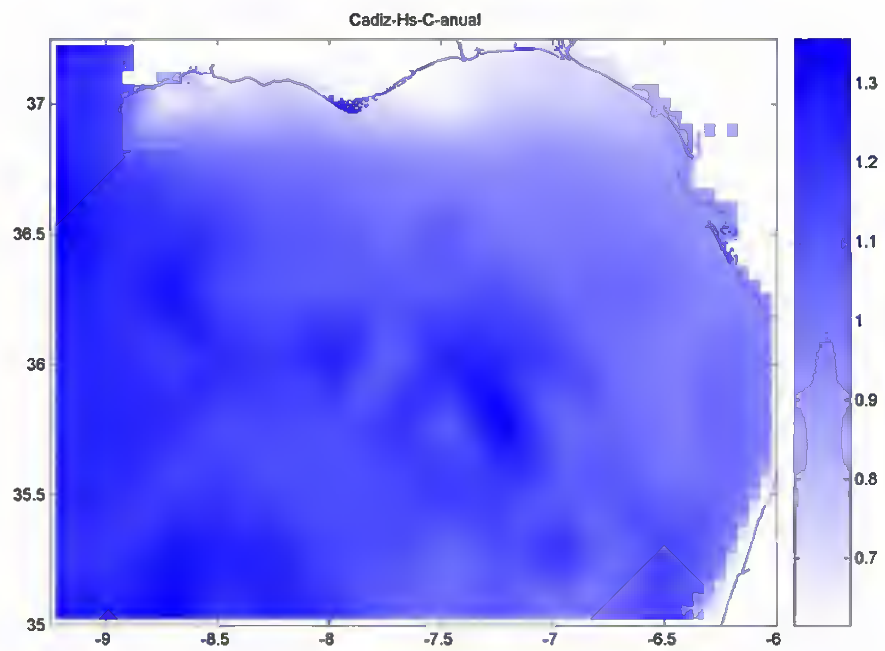


Figura 5.33. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



### 5.8.2. Calibración de $T_m$

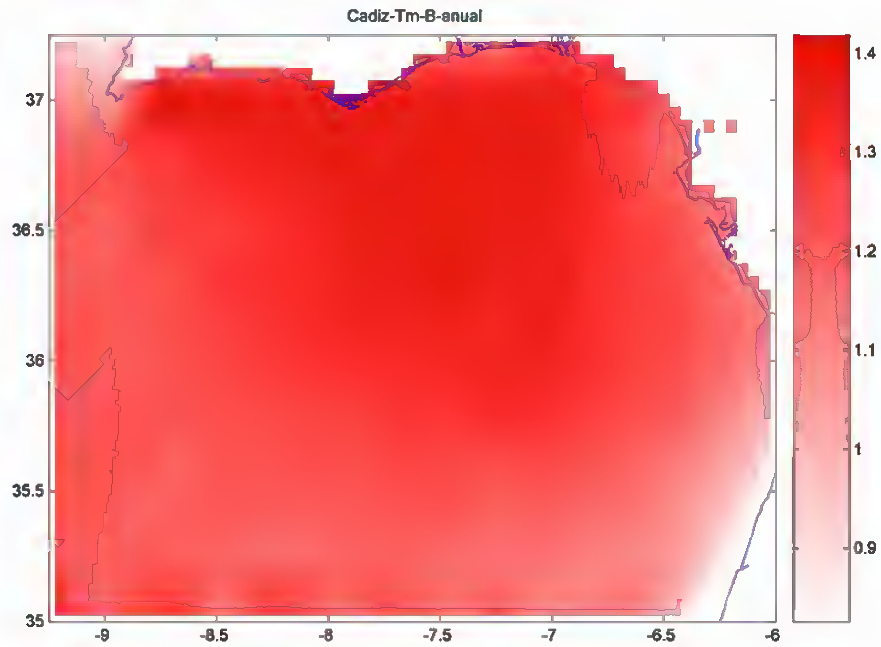


Figura 5.34. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

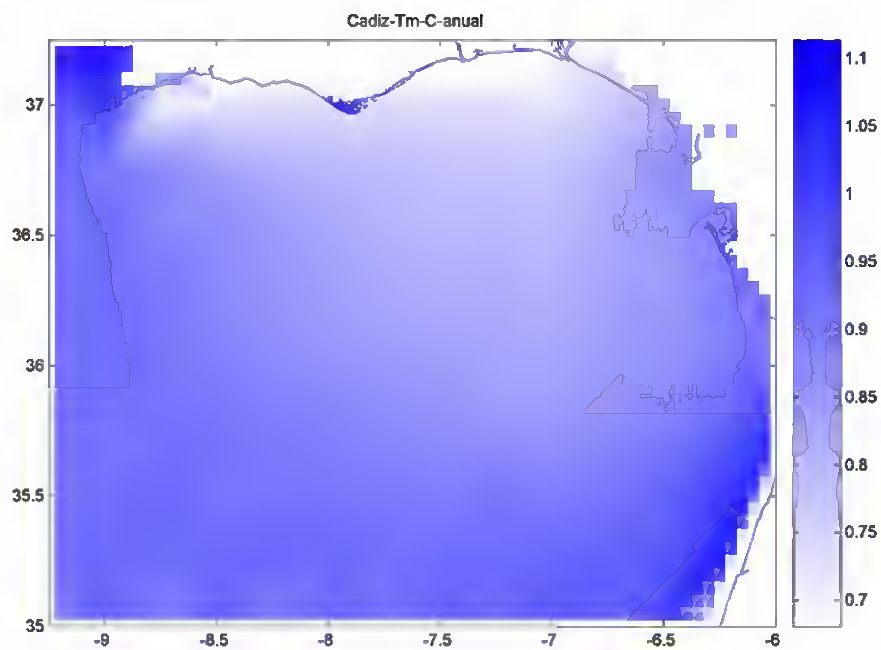


Figura 5.35. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$

## 5.9. Zona "Canarias"

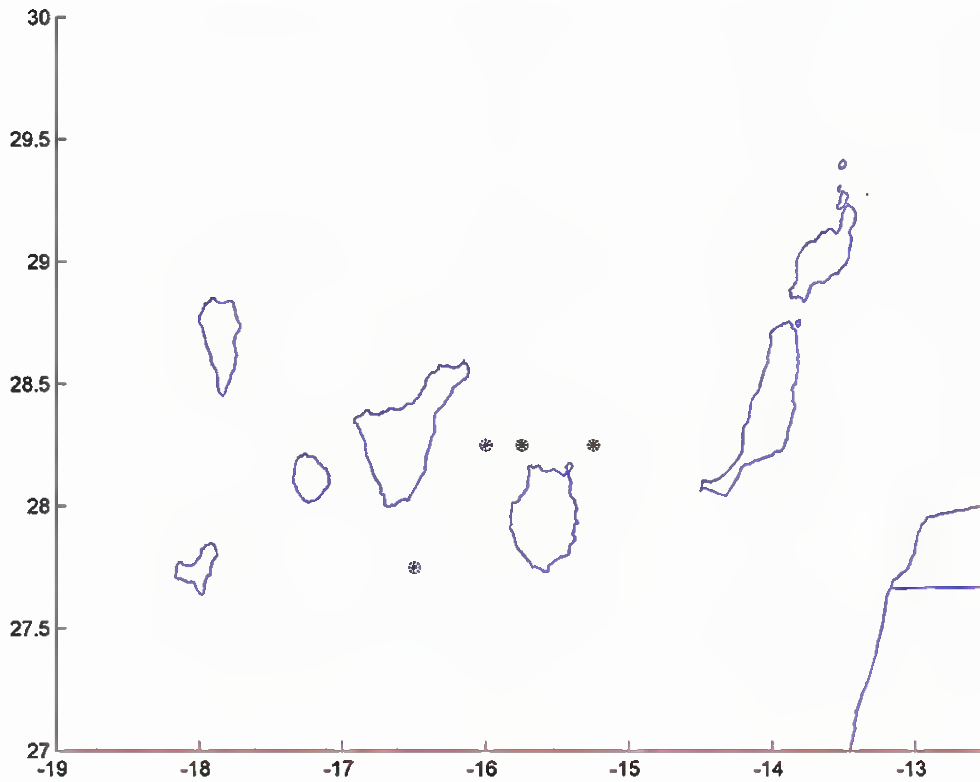


Figura 5.36. Localización de la zona de "Canarias" y boyas utilizadas para su calibración



### 5.9.1. Calibración de $H_s$

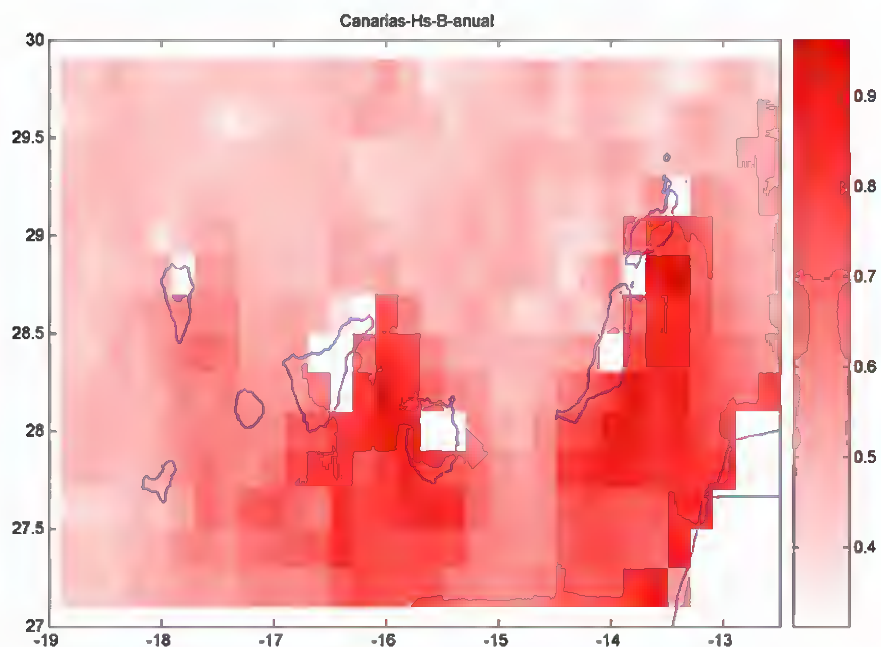


Figura 5.37. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

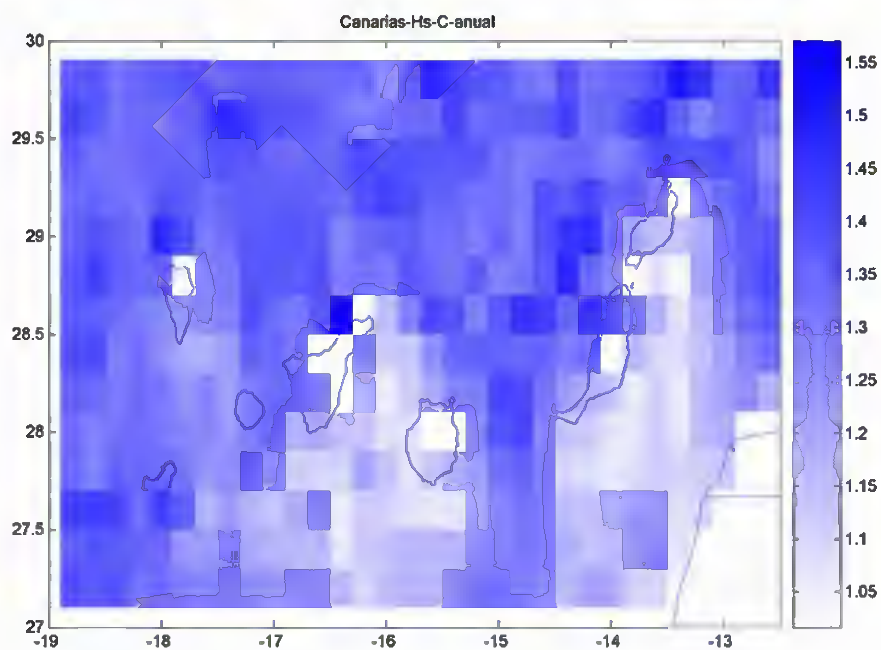


Figura 5.38. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$





**5.9.2. Calibración de  $T_m$**

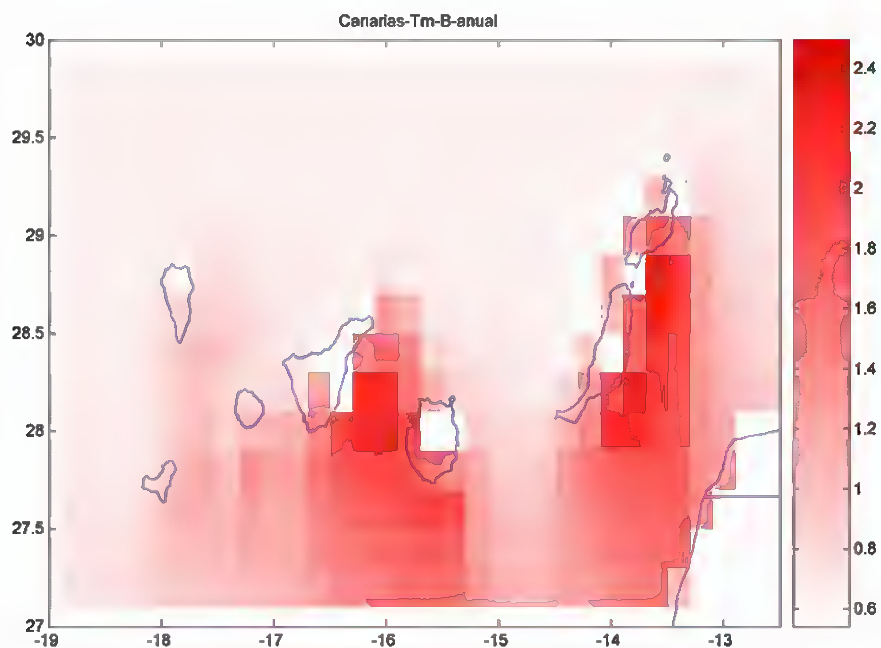


Figura 5.39. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $b(x)$

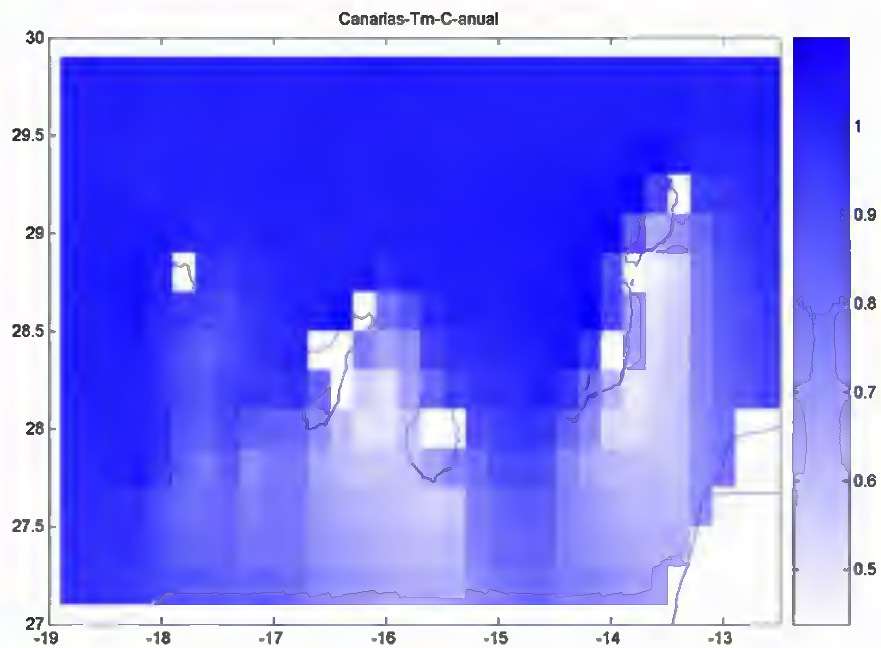


Figura 5.40. Distribución espacial del parámetro final de calibración  $c(x)$



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE  
BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

**CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

---



## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. Acerca de la utilidad de la calibración

Para poder estudiar con suficiente rigor los efectos del cambio climático sobre la costa se necesitan largas series de los estadísticos fundamentales de la dinámica marina, para poder así analizar las tendencias de estos en la totalidad de las costas insulares y peninsulares.

Haciendo un repaso de las distintas fuentes de datos existentes, se ha llegado a la conclusión de que, para el litoral español, la mejor base de datos es la de HIPOCAS, pero desde el punto de vista cuantitativo presenta algunas deficiencias. Se ha desarrollado una completa metodología para la calibración de esta base de datos.

Así actualmente, tras la calibración de la base de datos, de  $H_s$  y  $T_m$ , de HIPOCAS, se dispone de una serie de datos de 44 años (cada tres horas en el océano Atlántico y cada hora en el mar Mediterráneo) de una resolución espacial próxima a los 20 km y con una excelente calidad (análoga a la de las redes de medida).

Dicha metodología se puede extender a cualquier base de datos de variables geofísicas obtenidas mediante modelos de reanálisis, resultando una herramienta de gran utilidad para poder utilizar dichas bases de datos desde un punto de vista cuantitativo.

### 6.2. Acerca del método de calibración

El método de calibración desarrollado en este trabajo resuelve el problema de calibrar todo el espacio y tiempo de HIPOCAS con unos pocos datos fiables mediante la descomposición en modos (mediante la técnica EOF) de las variables a calibrar. Así con la modificación de los modos se recoge la calidad de la boyas y se extiende a todo el dominio del tiempo y del espacio.

Para intentar disminuir el problema temporal de la calibración en lugar de trabajar en el dominio del tiempo, se estudian las variables en términos probabilísticos, así se definen regímenes que reducen las dimensiones del problema, pero se pierde la información temporal. Por lo tanto se pasa de tener 24 x 365 x 44 unidades de tiempo, en el dominio del tiempo, a 12 unidades de tiempo, caracterizando las distribuciones estadísticas mes a mes (regímenes medios mensuales).

La definición de los regímenes y la caracterización de sus parámetros representativos dependen de la longitud de los registros. Por ese motivo no se ha utilizado la información





de las boyas cuyos registros netos (quitando los huecos) mes a mes, son menores de 5 años. Así se considera que los regímenes de las boyas y los de HIPOCAS son comparables.

Otra consideración para poder definir en los mismos términos los regímenes de HIPOCAS y de las boyas es que muchas boyas están en profundidades reducidas (fundamentalmente afectadas por refracción). El modelo WAM de HIPOCAS no considera refracción para su generación de oleaje, por lo tanto los registros de las boyas se han propagado hasta profundidades indefinidas previamente a su utilización para la calibración.

Hay otra pérdida de información que se produce una vez calibrados los regímenes y tras las simulaciones de Monte Carlo cuando se calculan los parámetros finales del método. Al comparar las simulaciones de los regímenes calibrados con los datos brutos de HIPOCAS se pierde información al ajustar a una función potencial. Si se agregan mes a mes todos los datos antes del ajuste, se pierde cierta información de la calibración temporal pero se mejoran los ajustes. Así para recuperar la información de las series temporales de HIPOCAS, en el último ajuste de los parámetros finales se pierde algo de información de la calibración temporal.

De todas maneras y a pesar de todas estas pérdidas de información, la calibración es suficientemente robusta como para mejorar la calidad de los datos de HIPOCAS. Las pérdidas de información se producen fundamentalmente antes y después de la calibración, en la calibración en sí sólo se pierde lo no explicado por los cuatro primeros modos de la descomposición EOF (2% como máximo), que fundamentalmente es ruido numérico del modelo.

Con el método de calibración presentado en este anejo se tiene una excelente calibración de los regímenes medios, tanto espacialmente como recogiendo la variación anual. A la hora de recoger esa información y calibrar la serie temporal se consiguen unos buenos resultados.

### **6.3. Acerca de los resultados**

Con los resultados obtenidos se comprueba que los resultados obtenidos tras la calibración aumentan mucho la calidad de la base de datos de HIPOCAS. Justo en la posición de la boya, en algunas ocasiones no se llega a obtener los registros de las boyas corregidas.

Este método de calibración está abierto a la definición de distintas zonas y a la utilización de distintas boyas para calibrar dentro de cada zona. Las zonas seleccionadas abarcan todo el litoral español.







El número ideal de boyas a utilizar en cada zona para calibrar es tres (como la zona de Valencia), con dos boyas la calibración queda escasa de datos, pero en algunas ocasiones (zonas de Baleares) no hay más boyas disponibles.

Este método de calibración es una herramienta que permite obtener en cada punto (cada 15-25 km) los regímenes medios anuales y también los mensuales. Estos regímenes mensuales calibrados muestran la modulación anual (invierno-verano). Se obtiene, así mismo, las series temporales calibradas en cada punto, a partir de estas series se pueden determinar los parámetros que se necesiten. Así, en la figura 5.1 se representa  $H_{s12}$  a lo largo de la línea de costa mediterránea.

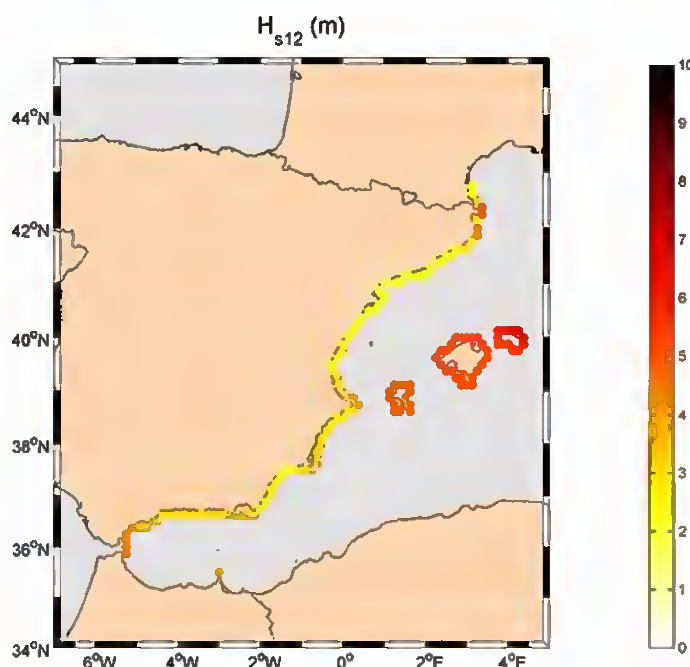


Figura 5.1.  $H_{s12}$  en la costa mediterránea

A pesar de que el método de calibración se basa en los regímenes medios, al conseguir calibrar las series temporales, los regímenes extremales determinados a partir de las series temporales calibradas también son válidos, aunque sólo se ha comprobado en un punto. En la figura 5.2 se muestran, como ejemplo del potencial que tienen estos datos,  $H_{sT=50}$  a lo largo de la costa mediterránea.





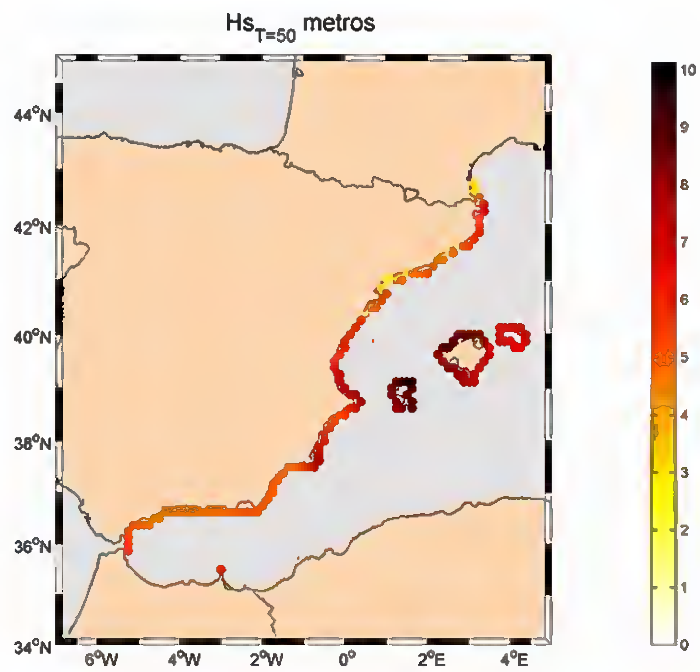


Figura 5.2.  $H_{sT=50}$  en la costa mediterránea.



IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA

ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

---



ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE  
BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS

**CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA**

---



## 7. BIBLIOGRAFÍA

ALVES, J. H. G. M.; YOUNG, I. R. (2003). On estimating extreme wave heights using combined Geosat, Topex/Poseidon and ERS-1 altimeter data. *Applied Ocean Research* 25, pp 167-186.

BALDACCI, A. et al. (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.

CIESLIKIEWICZ, W.; GRAFF, J. (1996). Sea state parameterisation using empirical orthogonal functions. *ICCE 1996*, Vol. 1, pp 703-716.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, pp 265-284.

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.

GIOC (2000). Estudio Básico para la Ampliación del Puerto de Gijón. Determinación del Clima Marítimo. Autoridad Portuaria de Gijón.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers*, 145 pags.

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.

SMITH, R. L. (2003). *Statistics of Extremes, with Applications in Environment, Insurance and Finance*. On line: <http://www.stat.unc.edu/postscript/rs/semstatrls.ps>

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<sup>o</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. OMAE2002-28604.

VON STORCH, H.; ZWIERS, Z.W (2001). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press.





WASA group (1998). Changing waves and storms in the Northeast Atlantic. Bulletin of the American Meteorological Society 79 (5)741-760.

WOLF, J. (2003). Effects of climate change on wave height at the coast. Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 13351.



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN  
ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE  
REANÁLISIS**

**ANEXO A. DISTRIBUCIONES**

---



## ANEXO A. DISTRIBUCIONES

### A.1. Distribución lognormal

Se dice que una variable aleatoria  $x$  es Lognormal si su logaritmo es normal. Haciendo uso del cambio de variable, se obtiene fácilmente que la función de distribución de  $x$  es:

$$y = F(x) = \Phi\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x) - \mu^*}{\sigma^*}\right)^2\right] dx; -\infty < x < \infty$$

donde

$\Phi(z)$  es la función de distribución de la variable  $z$  normal estándar  $N(0,1)$

$\mu^*$  es la media de la distribución normal original (parámetro de localización)

$\sigma^*$  es la desviación típica de la distribución normal original (parámetro de escala)

Para el papel probabilístico Lognormal las variables reducidas son

$$\xi = g(x) = \log(x)$$

$$\eta = h(y) = \Phi^{-1}(y)$$

y la familia de rectas es

$$\eta = a\xi + b = \frac{\xi - \mu^*}{\sigma^*}$$

con:

$$a = \frac{1}{\sigma^*}$$

$$b = -\frac{\mu^*}{\sigma^*}$$

A partir de  $\mu^*$  y  $\sigma^*$  de la distribución normal original se pueden determinar las  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución lognormal:

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





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

Y DESPEJANDO  $\mu^*$  Y  $\sigma^{*2}$  DE  $\mu$  Y  $\sigma$ :

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

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

## A.2. Distribución Gumbel de máximos

La función de distribución Gumbel de máximos de una variable aleatoria  $x$  es:

$$y = F(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{-(x-\lambda)}{\delta}\right)\right]; -\infty < x < \infty$$

donde

$\lambda$  es el parámetro de localización (es la moda de la distribución)

$\delta$  es el parámetro de escala (es proporcional a la desviación típica de la distribución,

$$\sigma^2 = \pi^2 \delta^2 / 6)$$

Para el papel probabilístico Gumbel de máximos las variables reducidas son

$$\xi = g(x) = x$$

$$\eta = h(y) = -\log[-\log(y)]$$

y la familia de rectas es

$$\eta = a\xi + b = \frac{\xi - \lambda}{\delta}$$

con:

$$a = \frac{1}{\delta}$$





$$b = -\frac{\lambda}{\delta}$$

### A.3. Distribución Weibull de máximos

La función de distribución Weibull de máximos de una variable aleatoria  $x$  es:

$$y = F(x) = \exp \left[ -\left( \frac{\lambda - x}{\delta} \right)^\beta \right]; -\infty < x \leq \lambda$$

donde

$\lambda$  es el parámetro de localización (es el mayor valor posible de la variable aleatoria  $x$ )

$\delta$  es el parámetro de escala

$\beta$  es el parámetro de forma

Para el papel probabilístico Weibull de máximos las variables reducidas son

$$\xi = g(x) = -\log(\lambda - x)$$

$$\eta = h(y) = -\log[-\log(y)]$$

y la familia de rectas es

$$\eta = a\xi + b = \beta(\xi + \log \delta)$$

con:

$$a = \beta$$

$$b = \beta \log(\delta)$$





**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS**

---



**ANEJO I -2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN  
ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE  
REANÁLISIS**

**ANEXO B. DESCOMPOSICIÓN EOF**

---



## ANEXO B. DESCOMPOSICIÓN EOF

### B.1 Descomposición EOF (empirical orthogonal function)

La técnica EOF es un método estadístico que descompone una determinada variable numérica espacio-temporal en una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas.

Con sólo unos pocos modos se puede explicar la mayor parte de la variación, tanto espacial como temporal, de la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ . Así, eligiendo los modos que explican la mayor parte de la variabilidad de  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  podemos representar ésta, considerando que el resto de la variabilidad es ruido numérico, o sea, no significativo para la variación espacio-temporal de la variable.

La variable genérica  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ , con  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  y  $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_m\}$ , se ordena en una matriz de  $n \times m$ . La variable  $\mathbf{x}$  es un vector que contiene las  $n$  posibles posiciones donde está definida  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ . La variable  $\tau$  es un vector que contiene los  $m$  posibles tiempos donde está definida  $Z(\mathbf{x}, \tau)$ . La matriz  $Z$  (de  $n$  filas y  $m$  columnas) tiene en cada elemento  $Z(i, j)$  el valor de la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  para la posición  $x_i$  y el tiempo  $\tau_j$ .

La descomposición EOF de  $Z(i, j)$  se puede realizar de dos maneras: la primera es una descomposición espacial de la variabilidad y la segunda es una descomposición temporal de la variabilidad (BALDACCI, 2001).

La descomposición espacial consiste en analizar los datos de la matriz  $Z$ , restándoles previamente la media espacial ( $Z_{MS}$ , sólo depende de  $\tau$ ):

$$Z_S(i, j) = Z(i, j) - Z_{MS}(j) = Z(i, j) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Z(k, j)$$

La descomposición temporal consiste en analizar los datos de la matriz  $Z$ , restándoles previamente la media temporal ( $Z_{MT}$ , sólo depende de  $\mathbf{x}$ ):

$$Z_T(i, j) = Z(i, j) - Z_{MT}(i) = Z(i, j) - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Z(i, k)$$

La descomposición espacial destaca los gradientes espaciales, mientras que la descomposición temporal revela las variaciones en el tiempo. Para este estudio se utiliza la descomposición temporal EOF, que se explica a continuación.





Tras calcular  $Z_T$ , matriz de  $n \times m$ , se descompone en una base ortogonal de funciones:

$$Z_T = FG^T \text{ (el superíndice } ^T \text{ significa transpuesta)}$$

donde  $F$  es la matriz de  $n \times n$  de los modos espaciales, que resulta ser la matriz de autovectores de la matriz espacial de correlación, la columna  $i$ -ésima es el modo espacial  $f_i$  (vector columna de  $n \times 1$ )

$$F = [f_1 | f_2 | \dots | f_n]$$

$G$  es la matriz de  $m \times n$  de las amplitudes temporales, la columna  $i$ -ésima es la amplitud temporal  $g_i$  (vector columna de  $m \times 1$ ).

$$G = [g_1 | g_2 | \dots | g_n]$$

La matriz espacial de correlación  $R_S$  (matriz de  $n \times n$ ) es:

$$R_S = Z_T Z_T^T$$

La combinación de autovectores ( $f_i$ ) y autovalores asociados ( $\lambda_i$ ) de  $R_S$  cumplirán:

$$R_S f_i = \lambda_i f_i$$

Las amplitudes temporales se determinarán una vez calculados los modos espaciales:

$$G = Z_T^T F$$

De manera análoga a la descomposición temporal se hará la descomposición espacial:

$$Z_S = LM^T$$

donde  $L$  es la matriz de  $n \times m$  de amplitudes espaciales y  $M$  es la matriz de  $m \times m$  de modos temporales, que se obtiene como los autovectores de la matriz temporal de correlación ( $R_T$ ).

$$R_T = Z_S^T Z_S$$





Las amplitudes espaciales se hallan despejando  $L$  de  $Z_s = LM^T$ :

$$L = Z_s M$$

Por lo tanto, y a modo de ejemplo, para reconstruir la variable  $Z(\mathbf{x}, \tau)$  a partir de la descomposición temporal con un número reducido de modos, se hará:

$$Z(\mathbf{x}, \tau) = Z_{MT}(\mathbf{x}) + f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + \dots + f_p(\mathbf{x})g_p(\tau)$$

siendo  $p$  menor que  $n$ , que es número total de modos.

La manera de decidir cuantos modos tomar, es evaluando el porcentaje de varianza que explican los  $p$  modos. La varianza que explica cada autovector es su autovalor (CIESLIKIEWICZ & GRAFF, 1996). Por lo tanto el porcentaje de varianza explicada por cada uno ( $\lambda_i$ ) es:

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k}$$

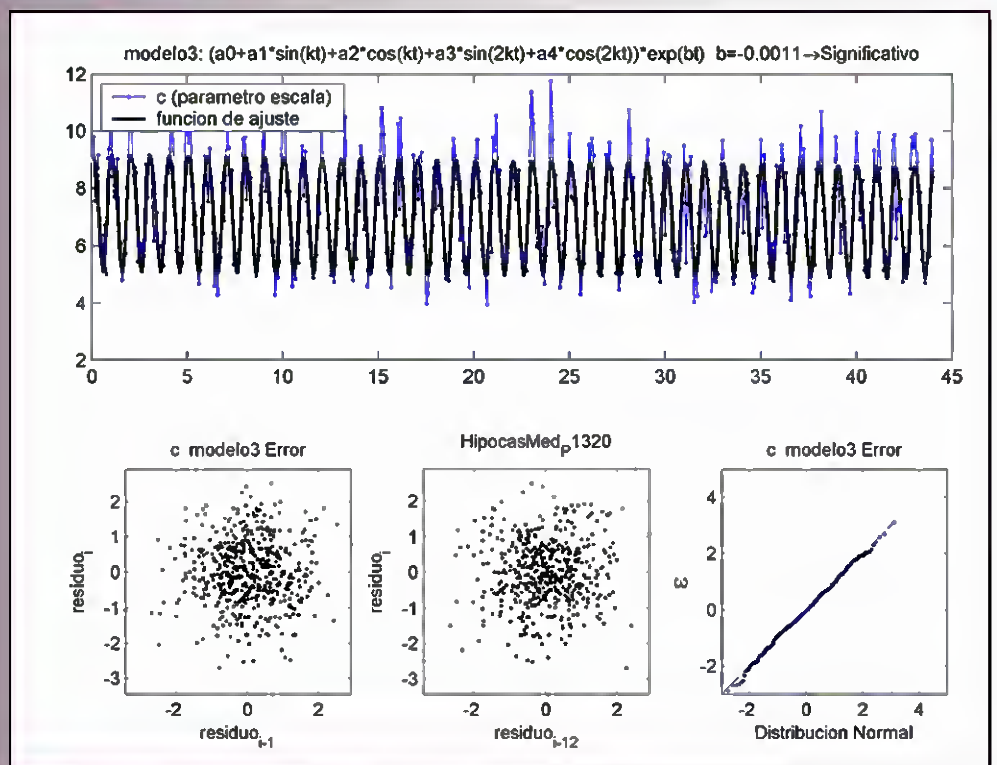
Si ordenamos los modos de manera decreciente según sus autovectores ( $f_1, f_2, \dots, f_p, \dots, f_n$  con sus autovectores ordenados de mayor a menor,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq \dots \geq \lambda_n$ ), el % que explican los  $p$  primeros modos es:

$$100 \frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k}$$



# IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA



### ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS DE LAS VARIABLES ANALIZADAS

**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

---



**ANEJO I -3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

**ANTECEDENTES**





## ANTECEDENTES

Este documento es uno de los informes (Anejo I-3) correspondientes al Convenio de Colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y la Universidad de Cantabria en “MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO”, suscrito el 28 de Noviembre de 2002.

Dichos documentos han sido elaborados por los miembros del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas:

- Iñigo J. Losada, Catedrático de la Universidad de Cantabria
- Fernando J. Méndez, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Maitane Olabarrieta, Licenciada en Ciencias del Mar
- María Liste, Licenciada en Ciencias del Mar
- Melisa Menéndez, Licenciada en Ciencias del Mar
- Antonio Tomás, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
- Ana Julia Abascal, Licenciada en Ciencias del Mar
- Pablo Agudelo, Ingeniero Civil
- Raúl Guanche, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos,

con la colaboración de:

- Alberto Luceño, Catedrático de la Universidad de Cantabria, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación,

bajo la dirección de Raúl Medina, Catedrático de la Universidad de Cantabria y Director del Grupo de Ingeniería, Oceanográfica y de Costas.

Santander, Noviembre de 2004.

Fdo.: Raúl Medina Santamaría  
*Investigador Principal*







## EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

El Estado Español, al igual que el resto de Estados Miembros, tiene el requerimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC) de implementar medidas concretas para adaptarse al ascenso del nivel y demás efectos del cambio climático en la costa. En concreto el Artículo 4 (b) de la CMCC establece que todas las Partes deberán formular, aplicar, publicar y actualizar regularmente programas nacionales que contengan medidas para facilitar la adaptación adecuada al cambio climático. En este sentido es la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Oficina Española del Cambio Climático, la encargada de arbitrar las medidas necesarias para desarrollar la política del Departamento en materia de cambio climático.

Consciente de la incidencia del cambio climático sobre la costa, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental solicitó la colaboración de la Universidad de Cantabria para el desarrollo de un Convenio de Colaboración destinado al desarrollo de estudios científicos y herramientas científicas específicas que doten de soporte científico-técnico al establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Esta iniciativa es la que dio origen al Convenio de Colaboración titulado CONVENIO DE COLABORACION ENTRE LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA EN MATERIA DE INVESTIGACIÓN SOBRE IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO, en el que se inscribe este documento.

## OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL CONVENIO

El objetivo general del Convenio es definir y establecer los mecanismos científicos, técnicos y económicos con el fin de proporcionar al Ministerio de Medio Ambiente la cobertura científica necesaria para atender sus intereses en materia de establecimiento de políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.

Para conseguir este objetivo general y los objetivos específicos asociados el proyecto, se ha estructurado en las siguientes fases:



**FASE I: EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA.****FASE I a. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN****FASE I b. ANÁLISIS DE DATOS DE CLIMA MARÍTIMO Y NIVEL DEL MAR****FASE I c. EVOLUCIÓN HISTÓRICA EN LA DINÁMICA COSTERA EN EL SIGLO XX****FASE I d. PROGNOSIS DE CAMBIO EN LA DINÁMICA COSTERA A LO LARGO DEL SIGLO XXI****ANEJO I-1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN PUNTUAL DE “BOYAS NUMÉRICAS”****ANEJO I-2. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN ESPACIAL DE BASES DE DATOS DE MODELOS DE REANÁLISIS****ANEJO I-3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

LA FASE I consta de varias tareas y tiene un doble objetivo. Por un lado, determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera en las últimas décadas. Estos cambios, han sido evaluados, entre otros, con base en datos históricos de niveles y oleajes a lo largo del litoral español. Por otro lado, analizar datos de predicción para estimar los previsibles cambios en la citada dinámica costera para el año horizonte 2100 bajo diversos escenarios de cambio climático.

**FASE II: EVALUACIÓN DE EFECTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA.****FASE II a. EFECTOS TEÓRICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL****SECCIÓN 1. ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA DEL LITORAL ESPAÑOL****SECCIÓN 2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA****FASE II b. ESTUDIOS DE DETALLE**

LA FASE II tiene como objetivo la evaluación de los efectos que los cambios en la dinámica costera originados por el cambio climático, determinados en la Fase I, pueden producir en los espacios naturales y usos humanos del litoral español. El análisis de los efectos se realizará de forma genérica, por “elementos del litoral”, y de forma particularizada en algunas zonas características de nuestro litoral.





**FASE III: ESTRATEGIAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA.**

LA FASE III tiene como objetivo la propuesta y evaluación de un sistema de indicadores e índices que aporten información objetiva para el establecimiento de políticas y estrategias de actuación para corregir, mitigar y prevenir los efectos del cambio climático en el litoral español obtenidos en la Fase II.

En este Documento se presentan los trabajos correspondientes al Anejo I-3:

**Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española.**

**Anejo I-3. Resultados de tendencias: análisis de punto y evolución espacial**



**IMPACTOS EN LA COSTA ESPAÑOLA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**



**FASE I. EVALUACIÓN DE CAMBIOS EN LA DINÁMICA COSTERA ESPAÑOLA**

**ANEJO I -3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL**

---



**ANEJO I -3. RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y  
EVOLUCIÓN ESPACIAL**

---



## RESULTADOS DE TENDENCIAS: ANÁLISIS DE PUNTO Y EVOLUCIÓN ESPACIAL

En este anejo se presentan los resultados que se han obtenido aplicando las metodologías de la Fase IB para el cálculo de tendencias. La base de datos histórica utilizada (1958-2001) se ha obtenido a través de los resultados del proyecto HIPOCAS. Para el análisis de tendencias de una determinada variable (régimen medio o extremal) se han realizado los mismos cálculos en cada nodo de la malla de HIPOCAS situado más cerca de la costa española. De esta forma se han analizado 276 nodos. Para cada uno de estos puntos se ha estudiado el comportamiento de los datos, resultados del modelo de ajuste y su diagnóstico, siguiendo la metodología descrita en la Fase IB. Dada la gran cantidad de figuras generada, en este anejo se van a presentar solamente las gráficas de salida para un punto (Análisis de Punto en el punto más cercano a Mahón, Islas Baleares) y los resultados finales para cada variable analizada en el litoral español (Análisis Espacial).

En el Análisis de Punto se presentan las siguientes figuras:

- *Régimen Medio*, resultados obtenidos para cada variable (altura de ola significativa, marea meteorológica y velocidad del viento).
  - Ajuste del modelo para el régimen medio.
  - Diagnóstico del modelo para el régimen medio.
  
- *Régimen Extremal*.
  - Figuras representativas de análisis preliminar de los datos.
  - Resultados del modelo extremal obtenido para cada variable (altura de ola significativa, marea meteorológica y velocidad del viento).
    - Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias.
    - Diagnóstico del modelo de análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias.
    - Resultados del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades.
    - Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades.





En el Análisis Espacial se representan los siguientes resultados de tendencias:

> Régimen Medio.

a) Variables escalares.

- Altura de ola,  $H_s$  :  $\beta_5(\mu)$ ,  $\beta_5(\sigma)$ ,  $\delta\bar{H}_s$ ,  $\delta H_{s12}$ .
- Marea meteorológica,  $MM$  :  $\beta_5(\mu)$ ,  $\beta_5(\sigma)$ .
- Viento,  $W$ :  $\beta_5(c_t)$ ,  $\beta_5(k_t)$ ,  $\delta\bar{W}$ .

b) Variables direccionales.

- Flujo medio de energía del oleaje,  $\delta\theta_{H_s}$ .
- Dirección del transporte potencial eólico,  $\delta\theta_W$ .

> Duraciones.

- Altura de ola,  $H_s$ :  $\delta D_{media}$ ,  $\delta D_{máxima}$ , Número de eventos por año.
- Velocidad del viento,  $W$ :  $\delta D_{media}$ ,  $\delta D_{máxima}$ , Número de eventos por año.

> Régimen Extremal.

Es importante mencionar que los círculos remarcados en negro son aquellos donde el valor de tendencia a largo plazo obtenido presenta una significancia superior al 95 %.

- Altura de ola,  $H_s$  :  $\beta_5(frecuencias)$ , Variación de temporales al año,  $\beta_5(intensidades)$ .
- Marea meteorológica,  $MM$  :  $\beta_5(frecuencias)$ ,  $\beta_5(intensidades)$ .
- Viento,  $W$ :  $\beta_5(frecuencias)$ ,  $\beta_5(intensidades)$ .





## **ANÁLISIS DE PUNTO**



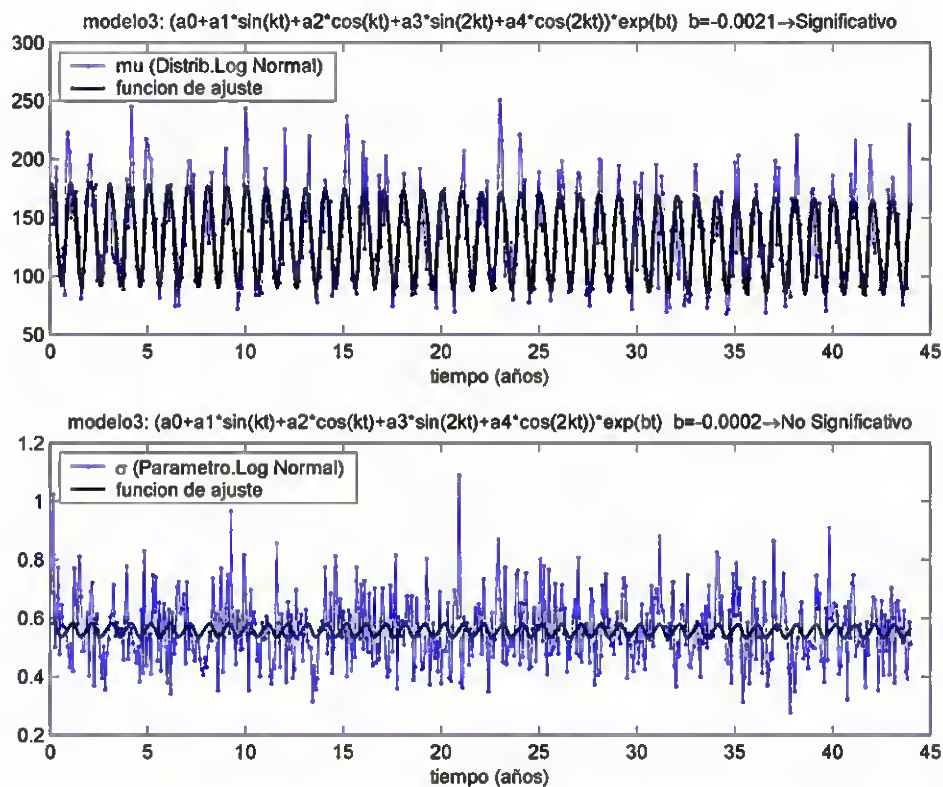


Figura 1 Ajuste del modelo establecido para el régimen medio de altura de ola.

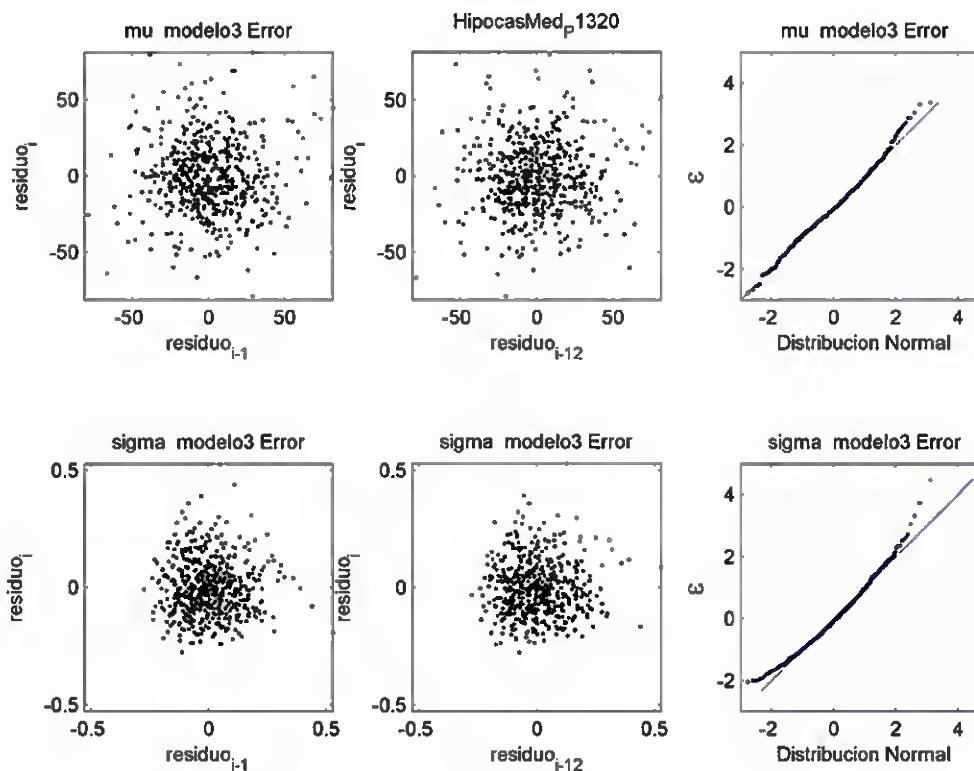


Figura 2 Diagnóstico del modelo para el régimen medio de altura de ola.





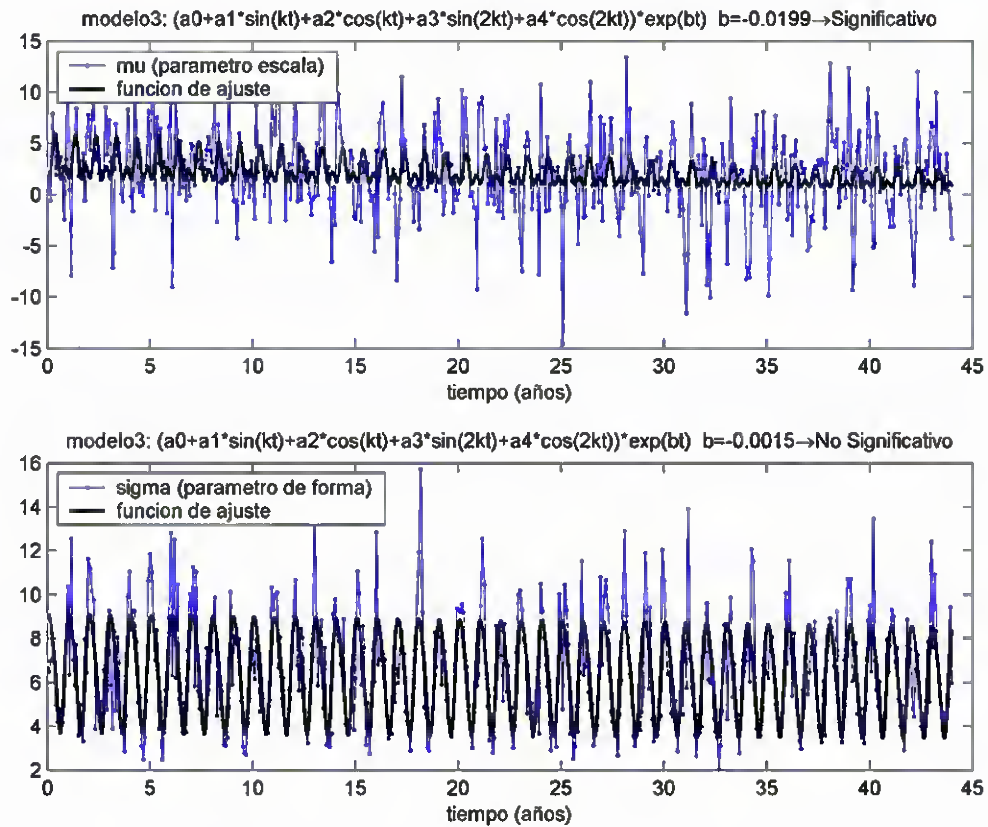


Figura 3 Ajuste del modelo establecido para el régimen medio de marea meteorológica.

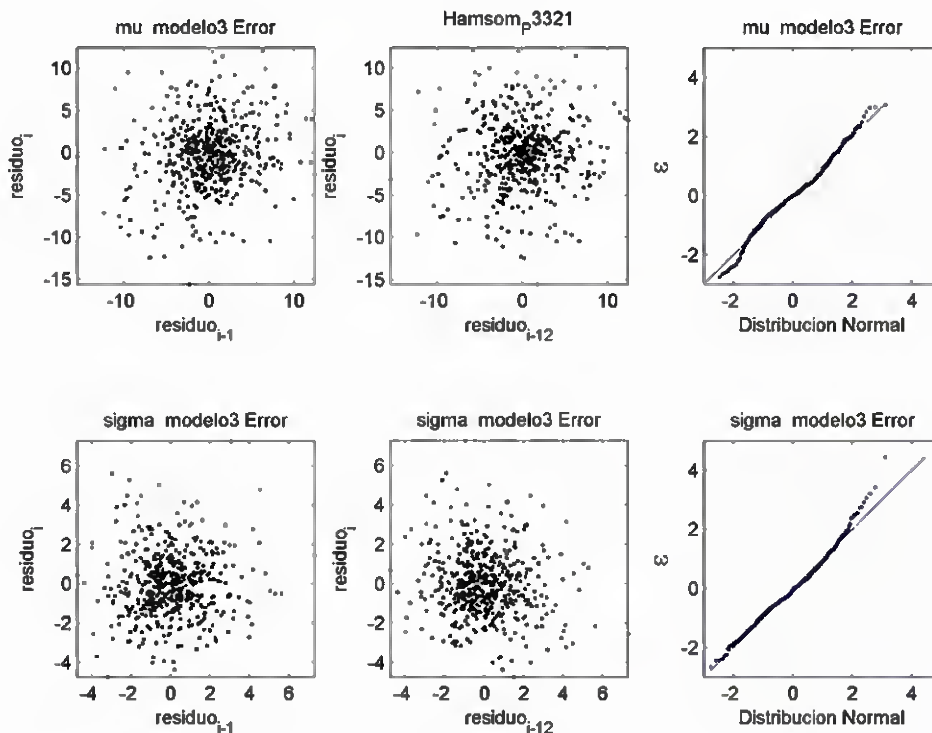


Figura 4 Diagnóstico del modelo para el régimen medio de marea meteorológica.



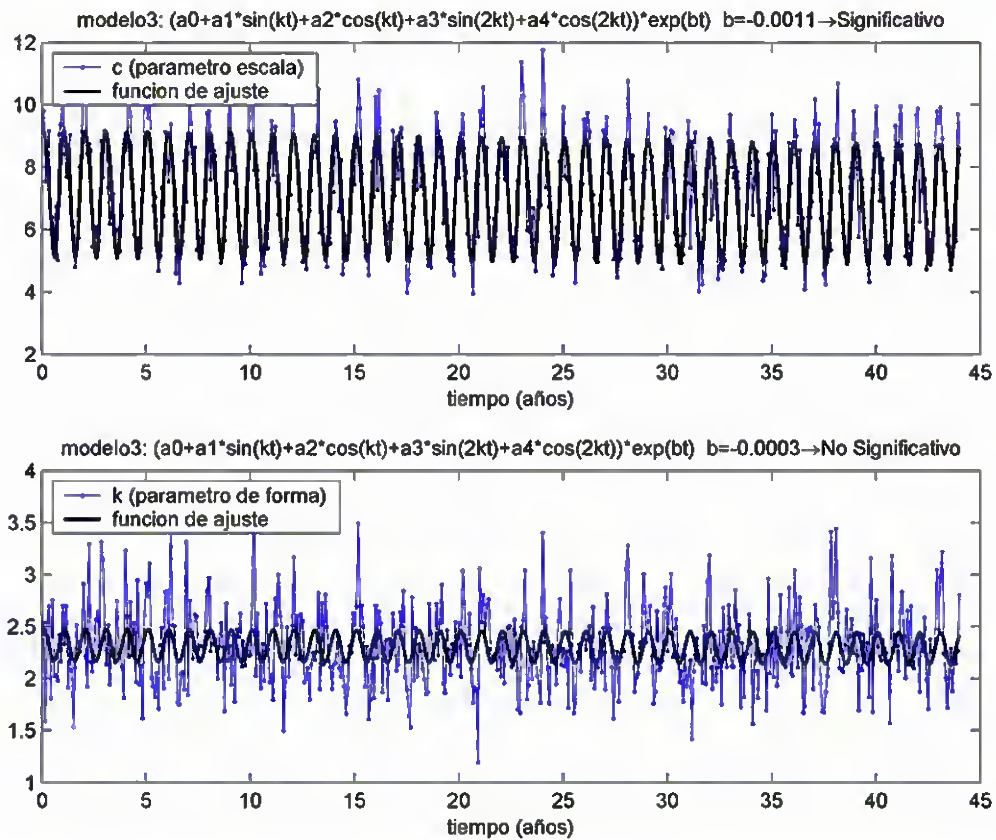


Figura 5 Ajuste del modelo establecido para el régimen medio de viento.

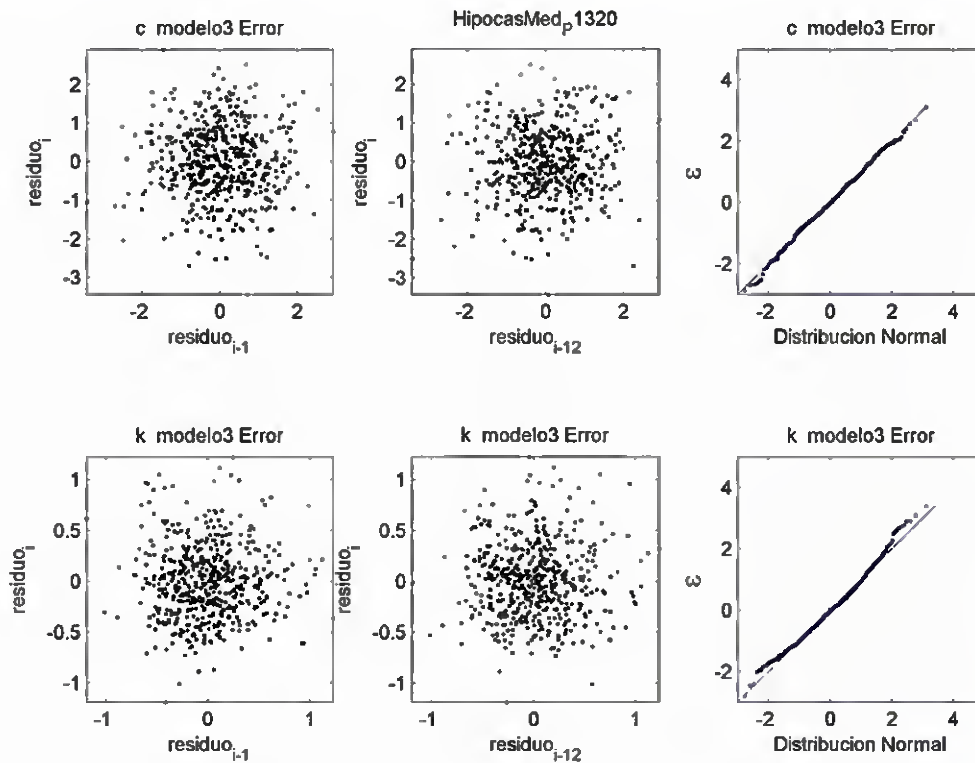


Figura 6 Diagnóstico del modelo para el régimen medio de Viento.



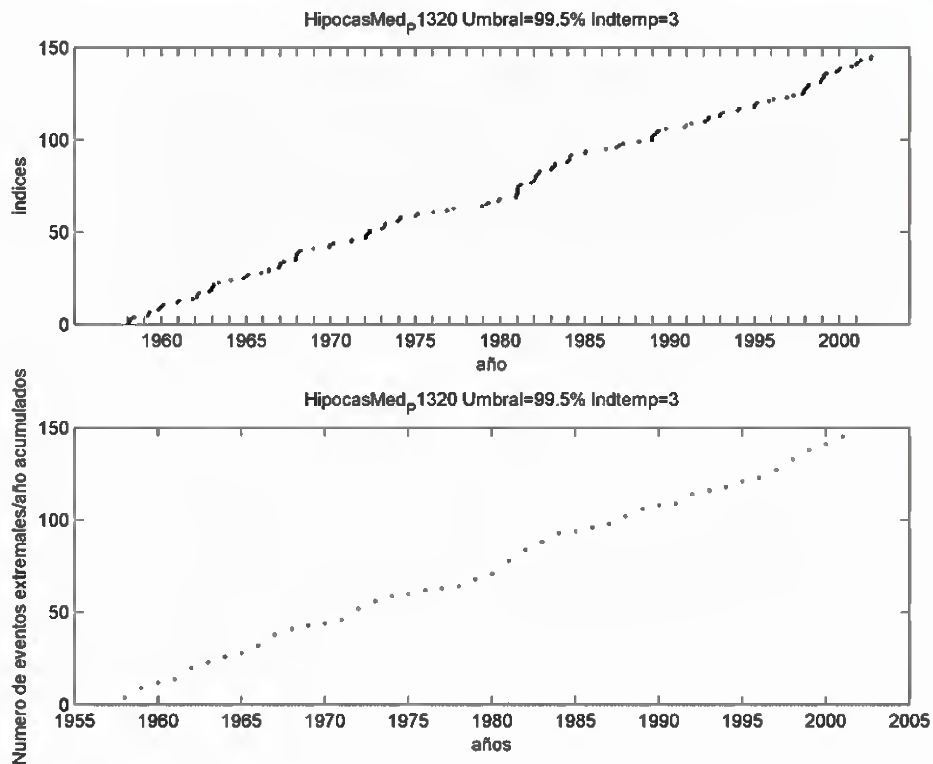


Figura 7 Ejemplo de estadística preliminar para el análisis de tendencias frecuencial del régimen extremal.

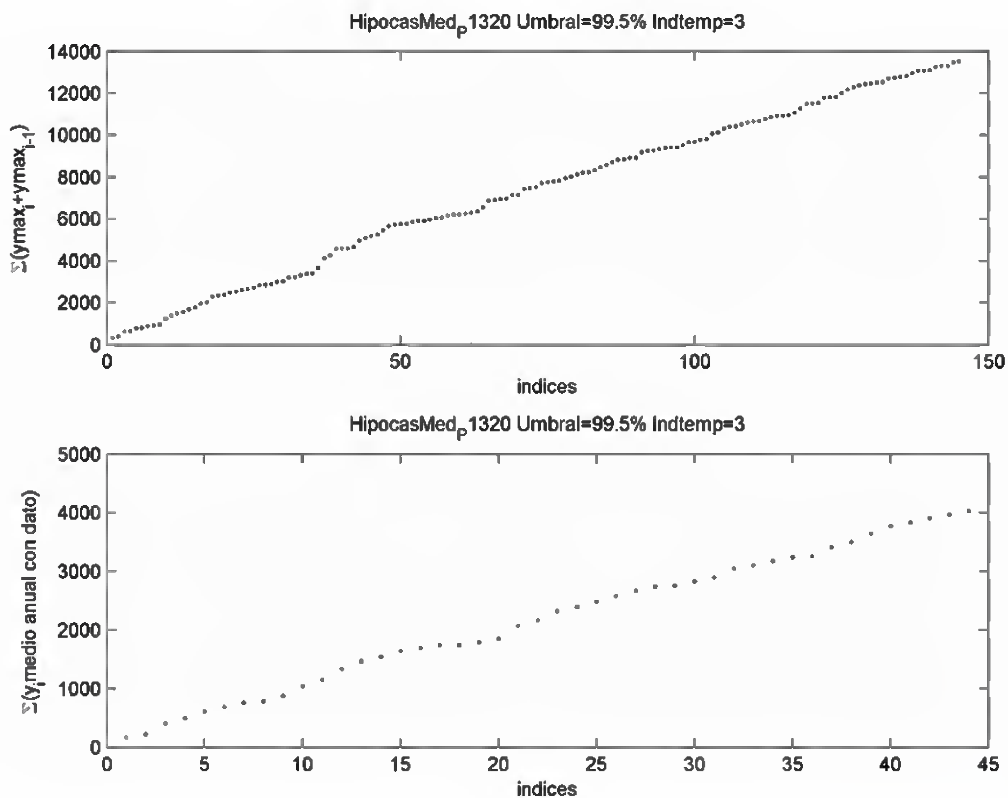


Figura 8 Ejemplo de estadística preliminar para el análisis de tendencias de intensidades del régimen extremal.



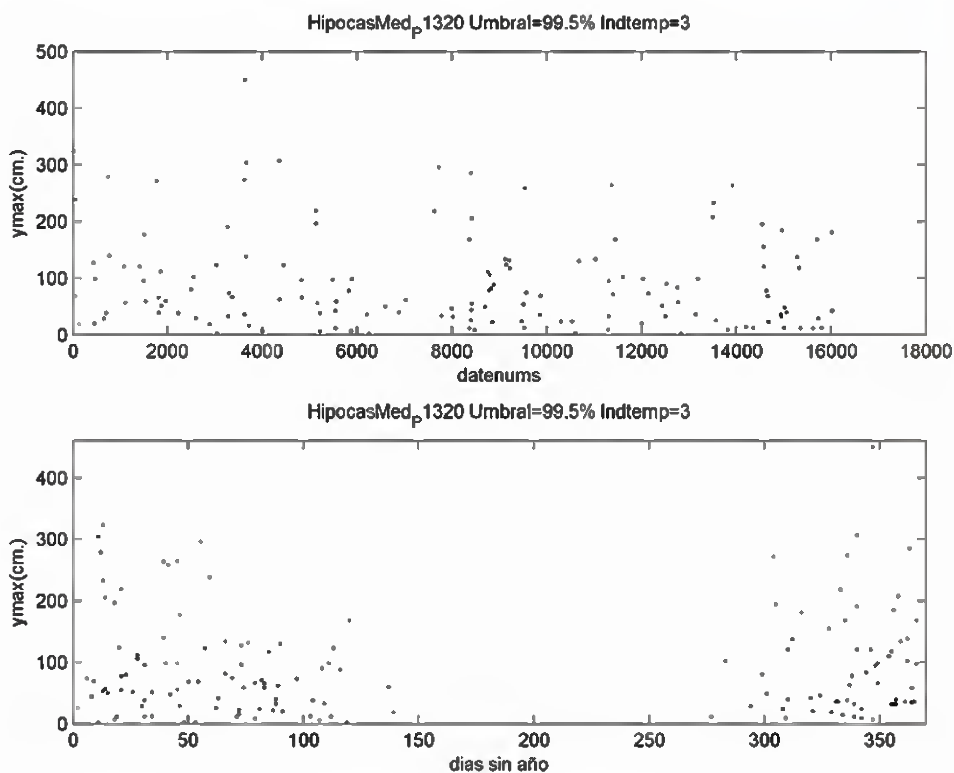


Figura 9 Ejemplo de estadística preliminar para el análisis de tendencias del régimen extremal.

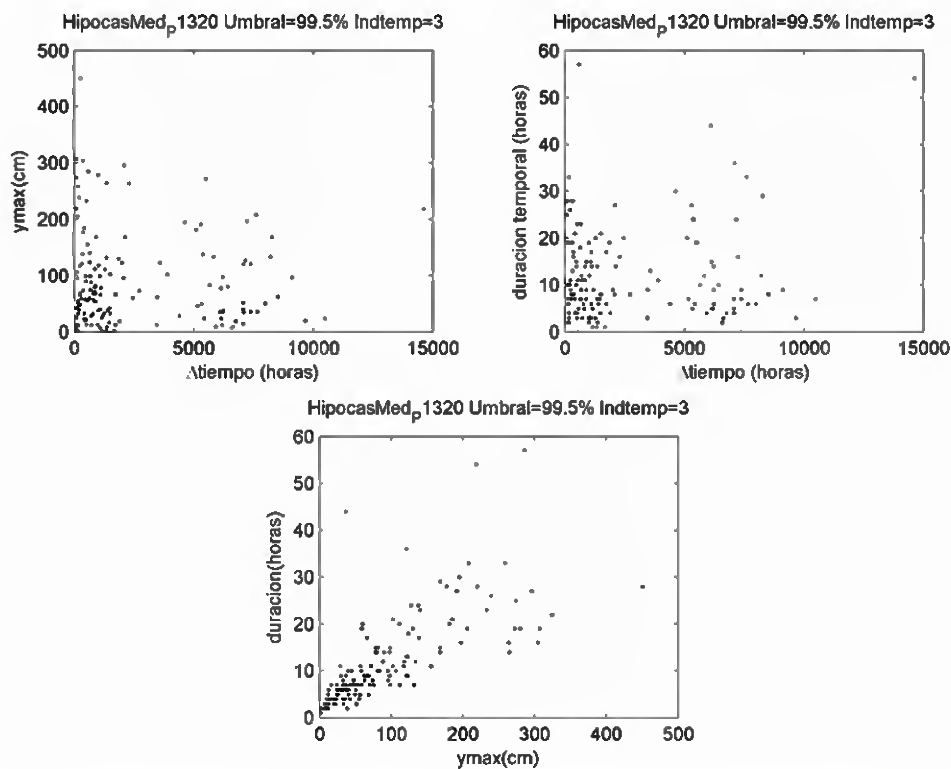


Figura 10 Ejemplo de estadística preliminar para el análisis de tendencias del régimen extremal.



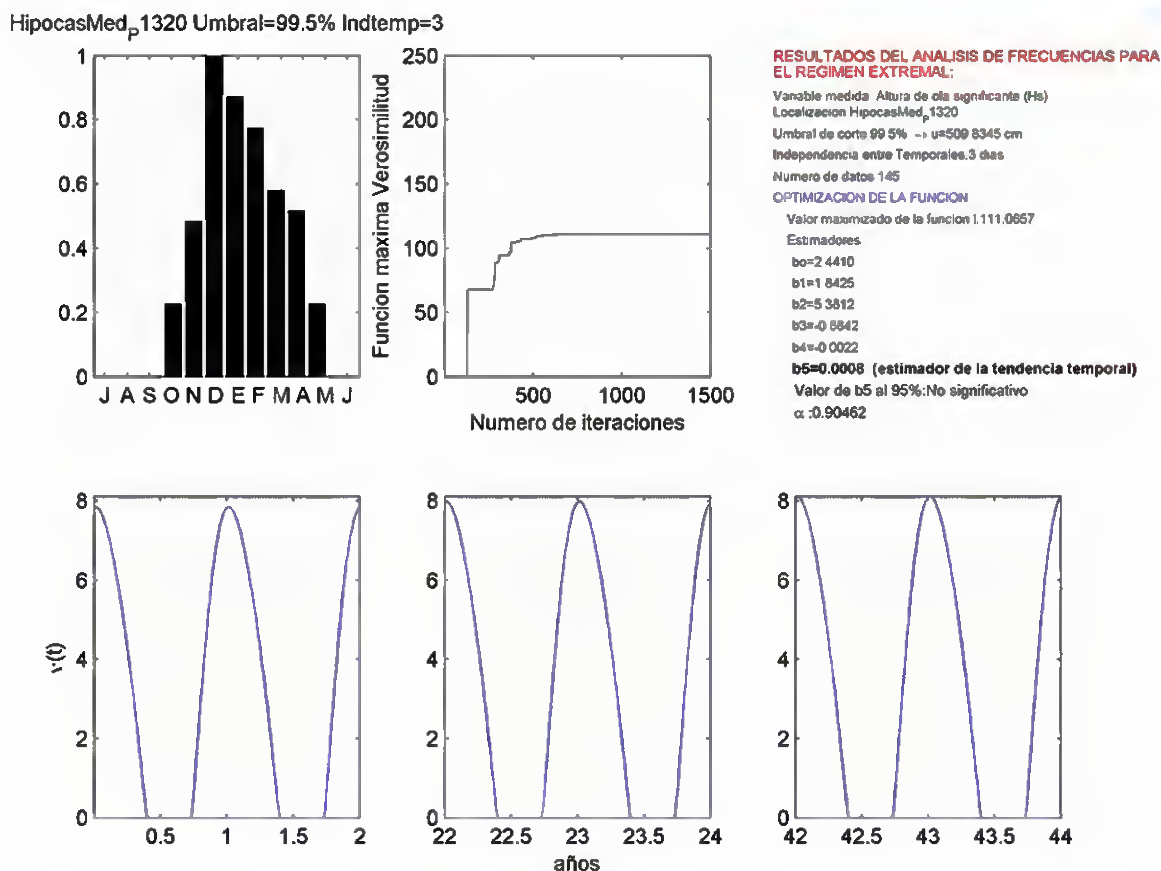


Figura 11 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremo de frecuencias de altura de ola signficante.

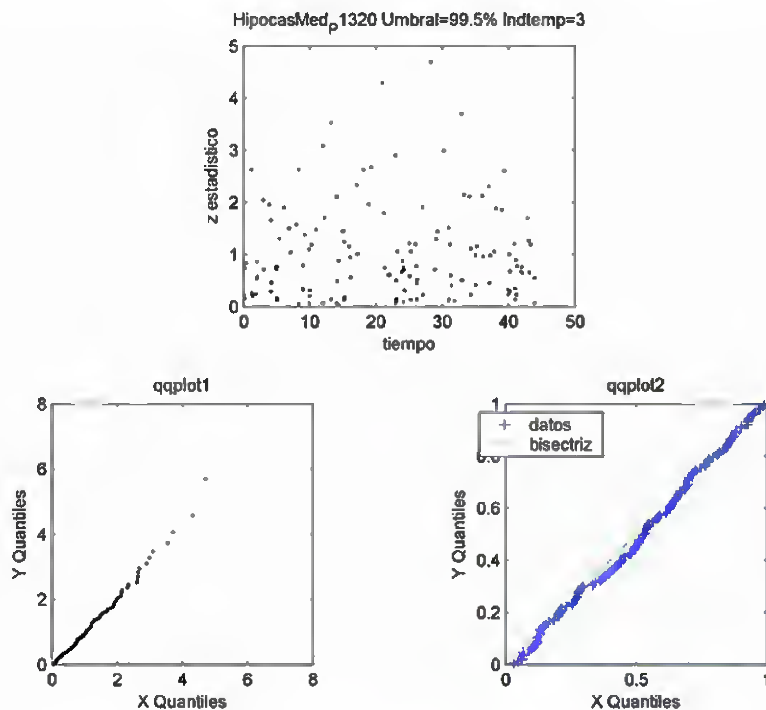


Figura 12 Diagnóstico del modelo del análisis de tendencias del régimen extremo de frecuencias de altura de ola signficante.





**MODELO COMBINADO GPD-FREC ANALISIS TENDENCIAS:**

Variable medida: Altura de Ola (Hs)  
 Localizacion: Resultados\_GPD-FrecHipocasMed\_p1320  
 Umbral de corte: 99.5% → u=509.8345 cm.  
 Independencia entre Temporales: 3 días  
 Numero de datos: 145

**OPTIMIZACION DE LA FUNCION:**

Valor maximizado de la funcion l: -687.0004

Estimadores:

- b0=542.1374
- b1=77.4359
- b2=229.5523
- b3=-56.0944
- b4=-22.0222
- Cte<sub>v</sub>=0.1124
- ξ=-0.2258
- b5=-0.0010 (estimador de la tendencia temporal)**
- α<sub>b5</sub>: 0.42097 Valor de b5 al 95%: No significativo

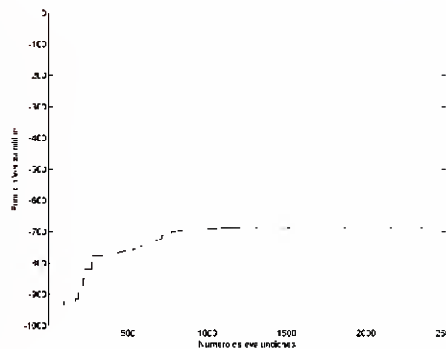


Figura 13 Resultados del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades de altura de ola significante.

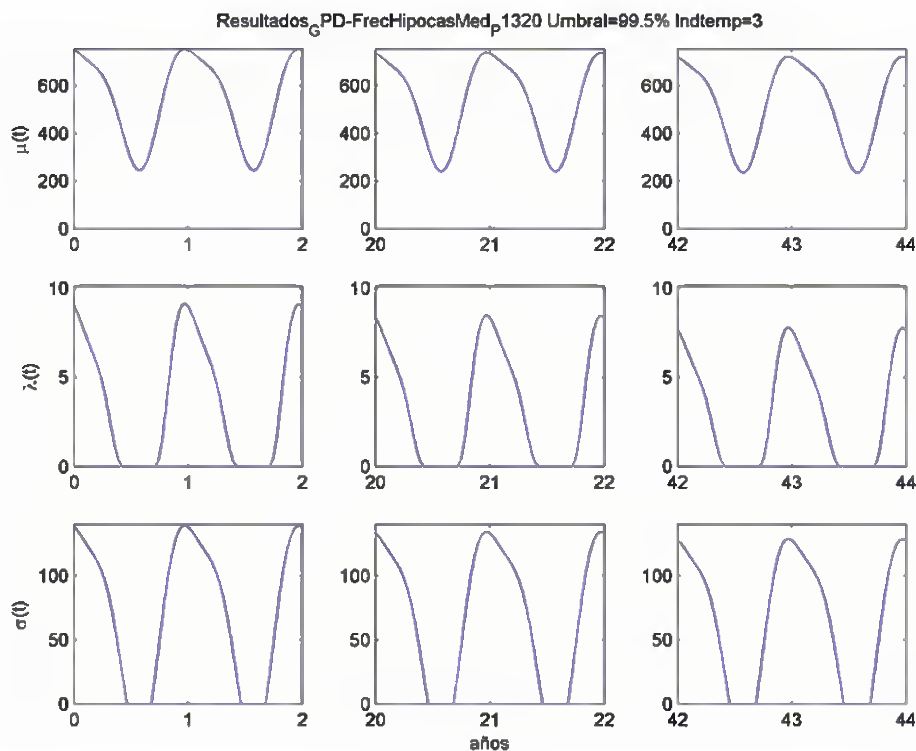


Figura 14 Resultados del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades de altura de ola significante.



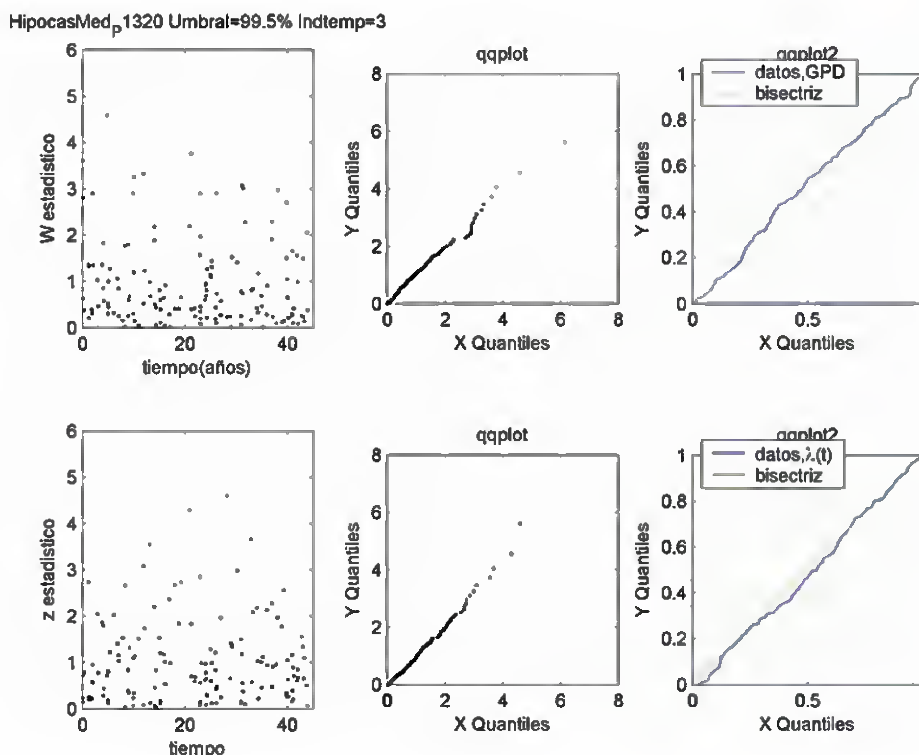


Figura 15 Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremo de intensidades de altura de ola significativa.

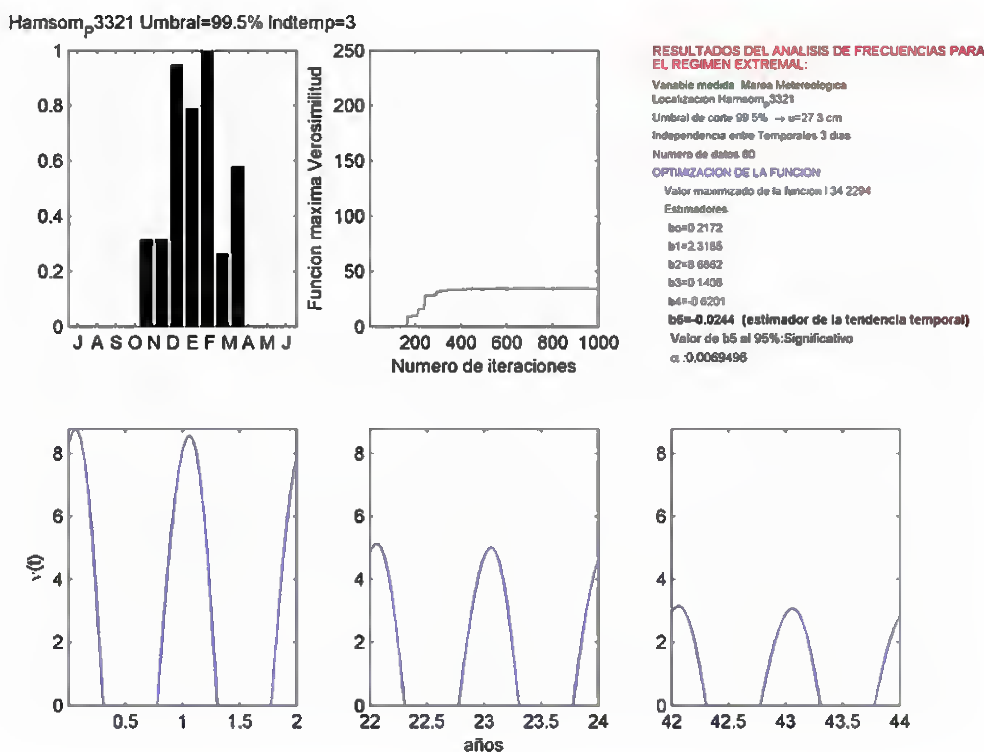


Figura 16 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremo de frecuencias de marea meteorológica.



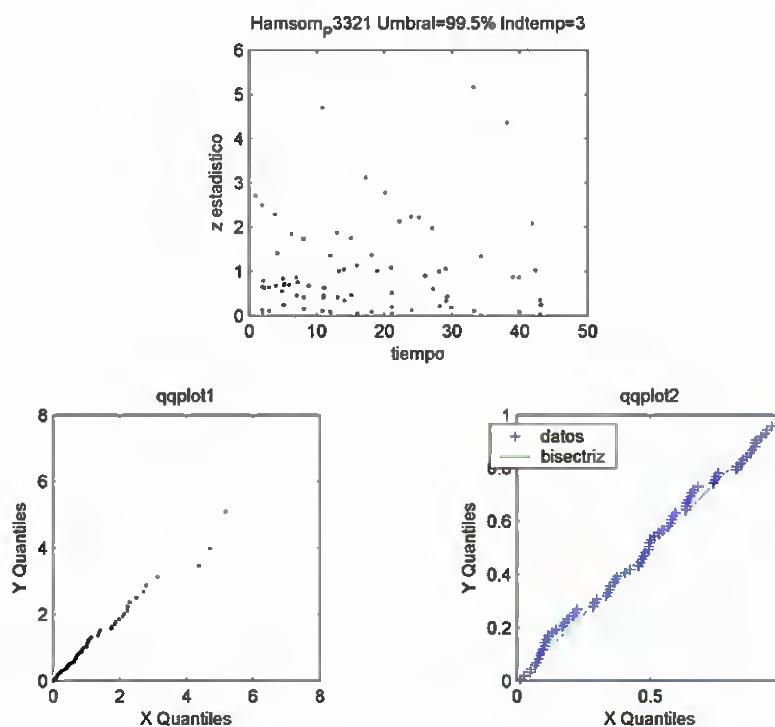


Figura 17 Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremal de frecuencias de marea meteorológica.

**MODELO COMBINADO GPD-FREC ANALISIS TENDENCIAS:**

Variable medida: Marea Meteorologica (cm.)

Localizacion:Hansom<sub>p</sub>3321

Umbral de corte:99.5% → u=27.3 cm.

Independencia entre Temporales:3 dias

Numero de datos:80

**OPTIMIZACION DE LA FUNCION:**

Valor maximizado de la funcion l:-156.4331

Estimadores:

b<sub>0</sub>=23.0985

b<sub>1</sub>=5.2843

b<sub>2</sub>=17.7720

b<sub>3</sub>=-2.7229

b<sub>4</sub>=-3.6389

Cte<sub>ψ</sub>=0.0913

ξ=-0.5178

b<sub>5</sub>=-0.0029 (estimador de la tendencia temporal)

α<sub>b5</sub>:0.008282 Valor de b<sub>5</sub> al 95%:Significativo

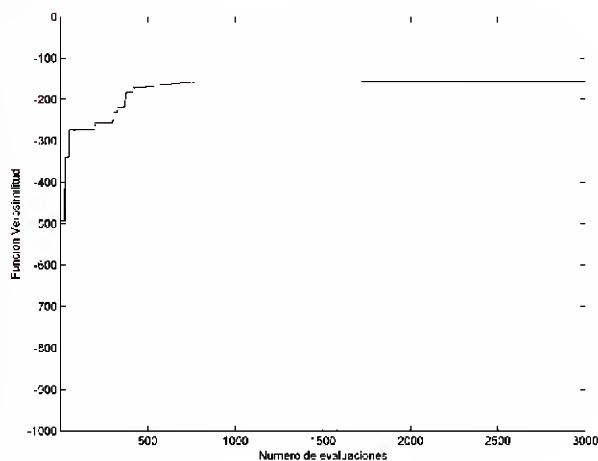


Figura 18 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de intensidades de marea meteorológica.





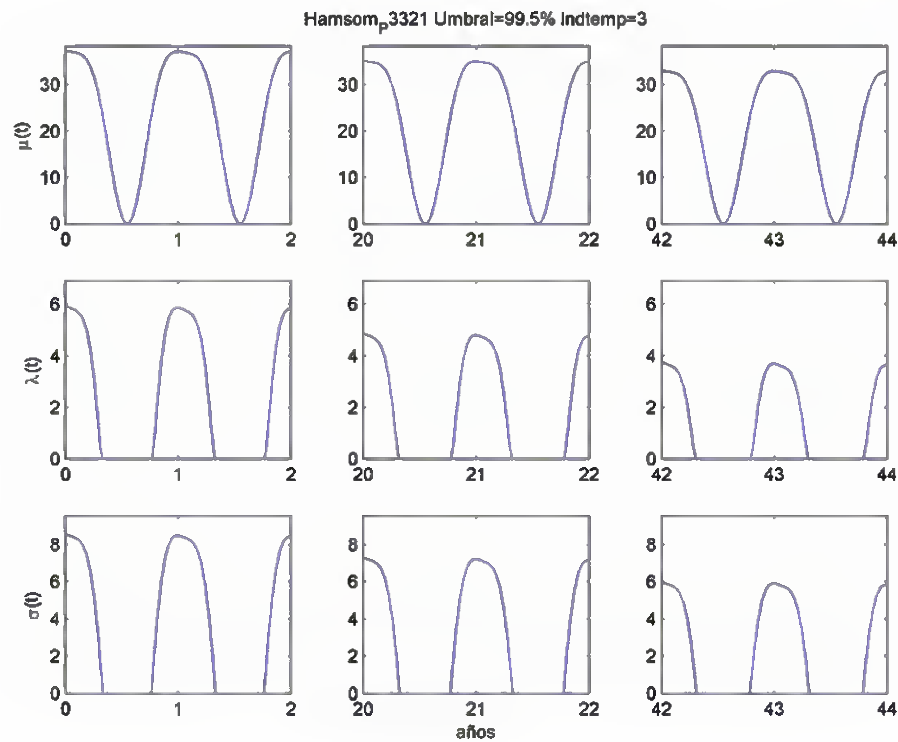


Figura 19 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de intensidades de marea meteorológica.

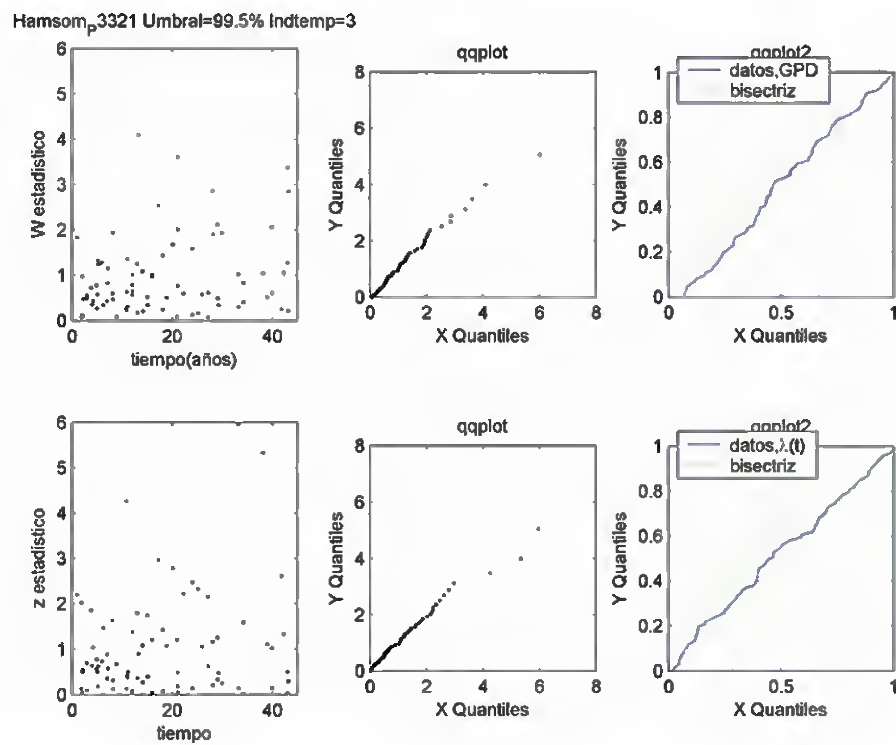


Figura 20 Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades de marea meteorológica.



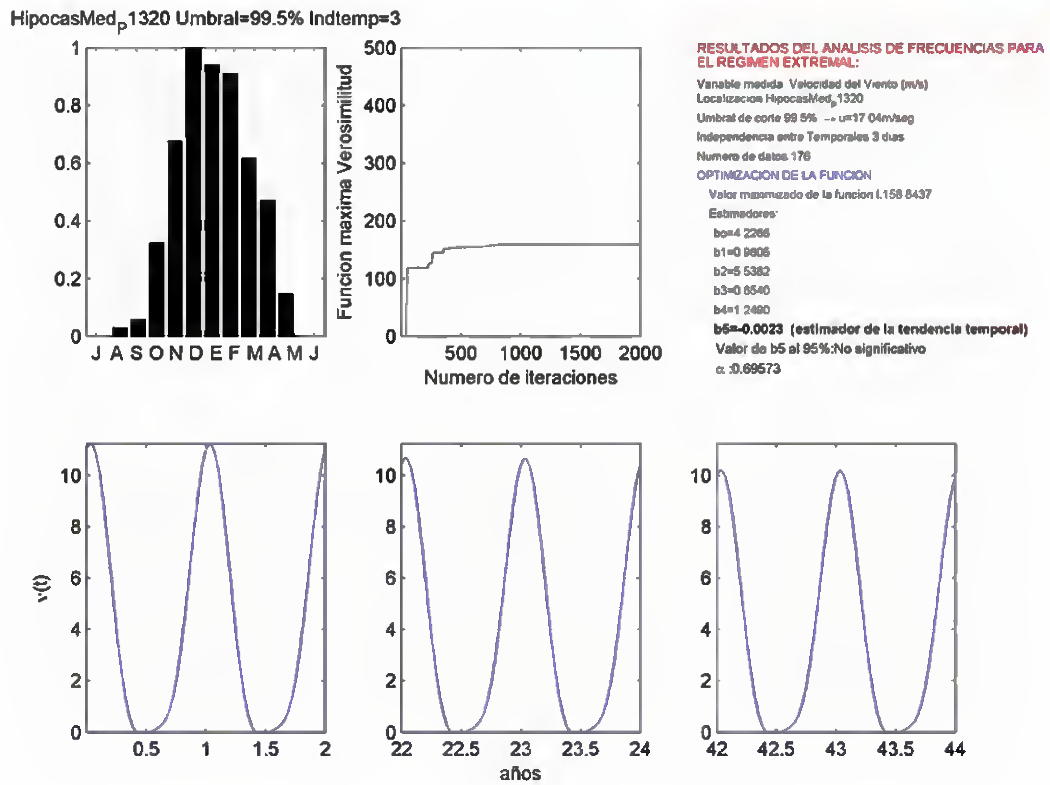


Figura 21 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias de viento.

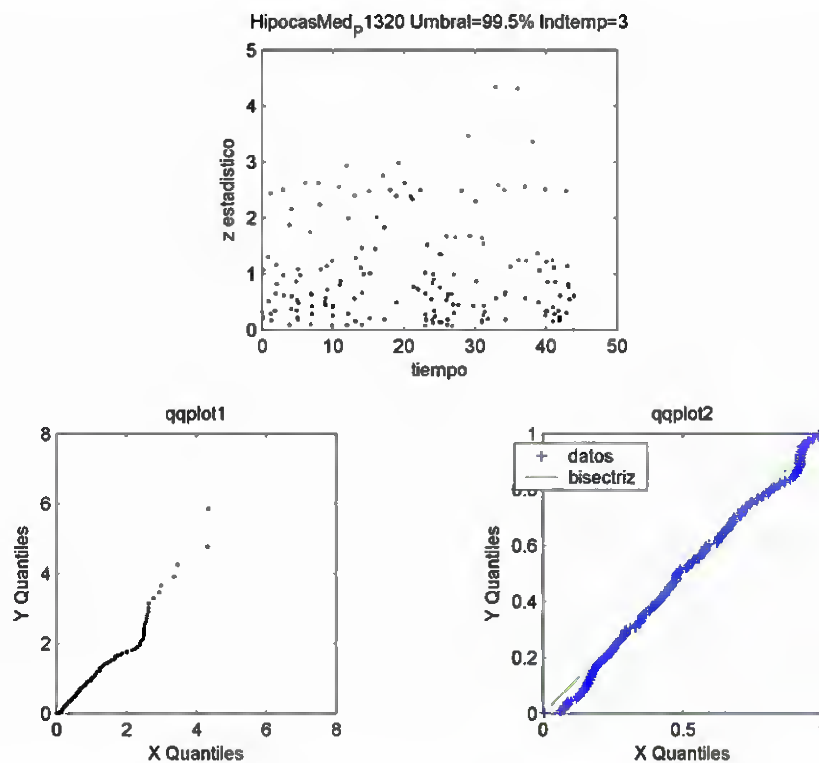


Figura 22 Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremal de frecuencias de viento.





**MODELO COMBINADO GPD-FREC ANALISIS TENDENCIAS:**

Variable medida: velocidad Viento (m/seg)

Localizacion: HipocasMed<sub>p</sub>1320

Umbral de corte: 99.5% →  $u=17.04$  m/seg

Independencia entre Temporales: 3 dias

Numero de datos: 176

**OPTIMIZACION DE LA FUNCION:**

Valor maximizado de la funcion l: -132.8203

Estimadores:

$b_0=18.5360$

$b_1=0.6770$

$b_2=4.0135$

$b_3=-0.3055$

$b_4=-0.3079$

$Cte_{\psi}=0.0793$

$\xi=-0.1739$

$b_5=-0.0004$  (estimador de la tendencia temporal)

$\alpha_{b_5}: 0.5831$  Valor de  $b_5$  al 95%: No significativo

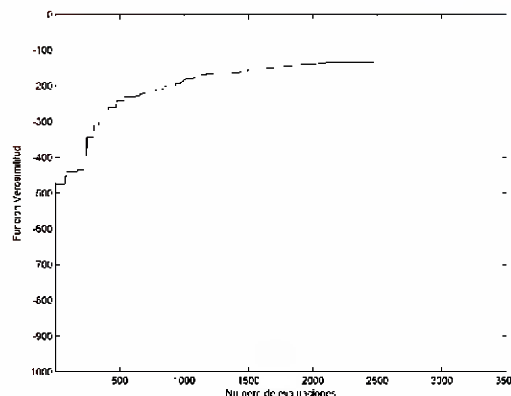


Figura 23 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de intensidades de viento.

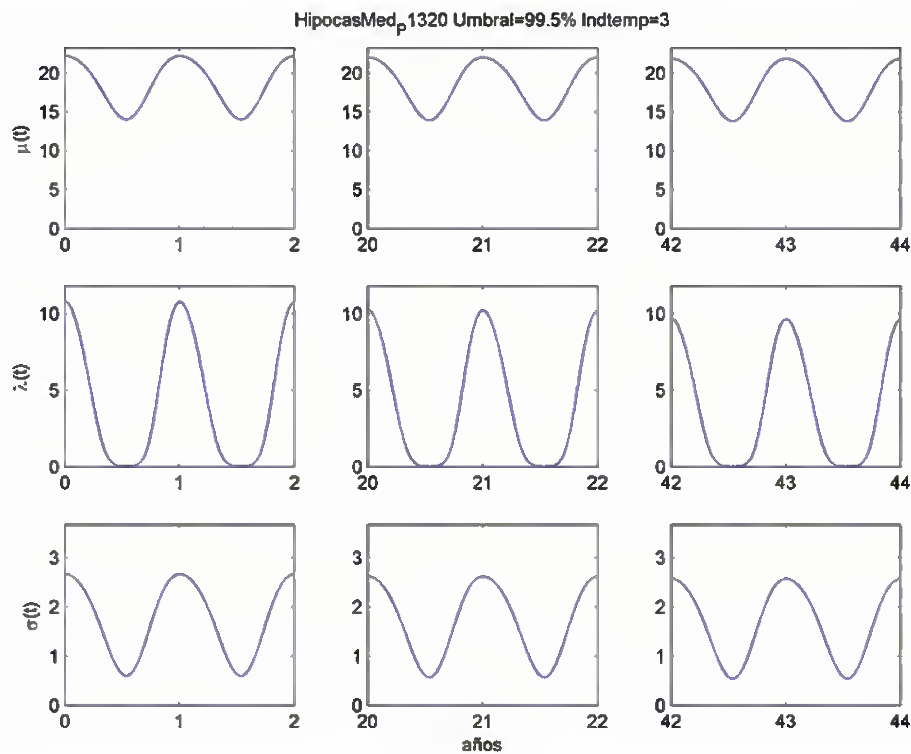


Figura 24 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de intensidades de viento.



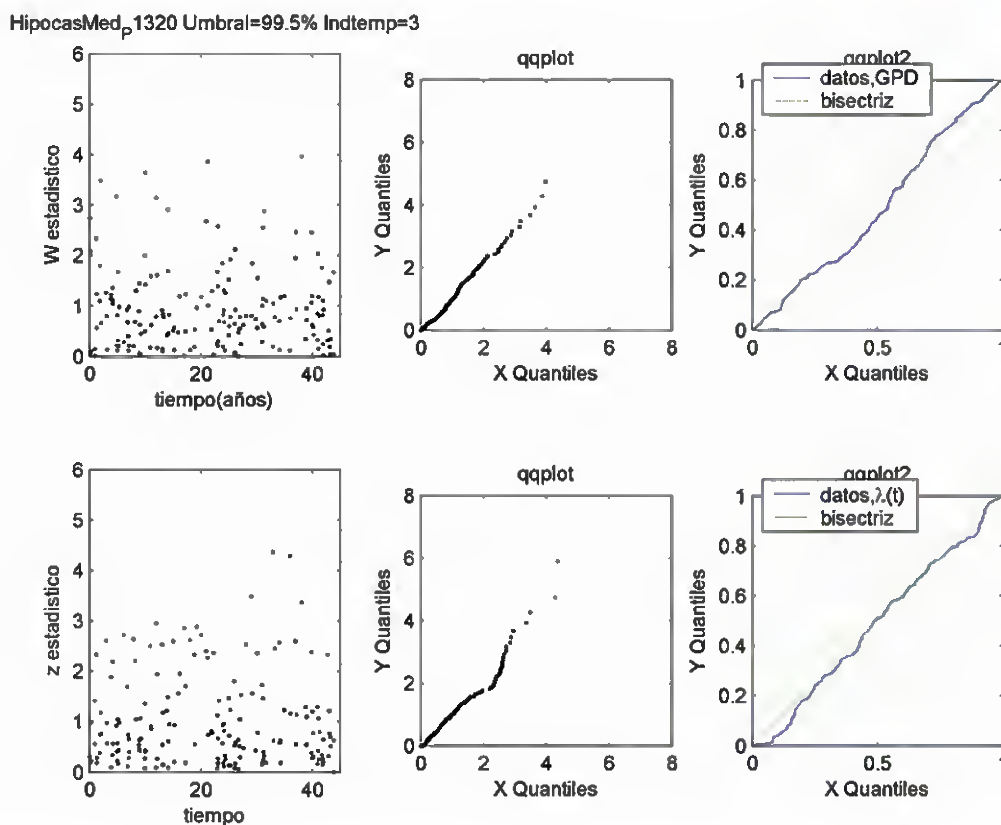


Figura 25 Diagnóstico del modelo de tendencias del régimen extremal de intensidades de viento.





## **ANÁLISIS ESPACIAL**



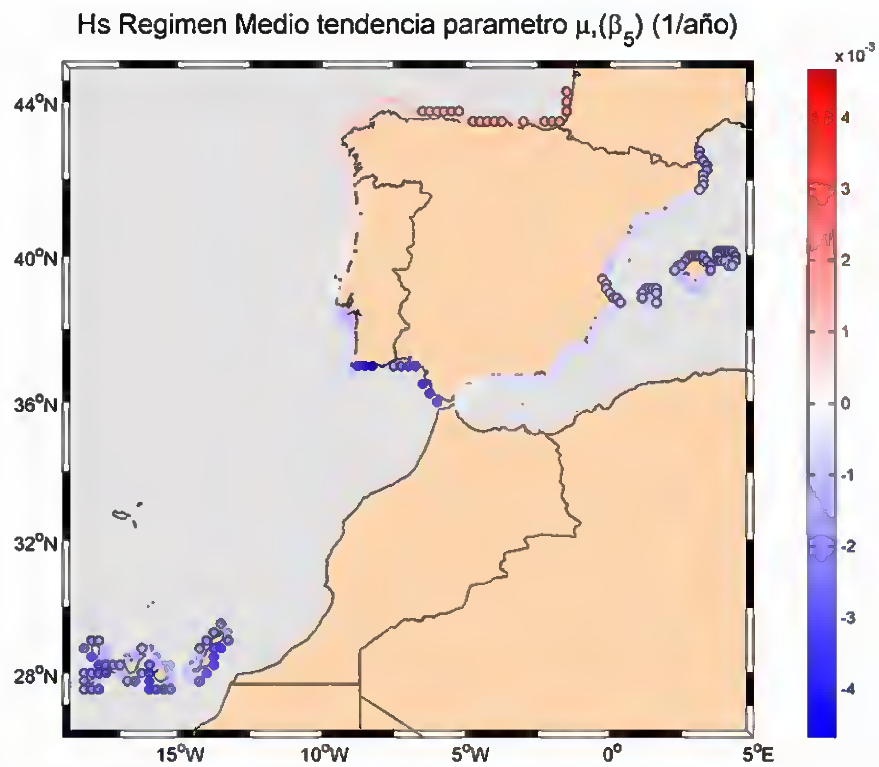


Figura 1 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de altura de ola significativa, parámetro  $\mu(t)$ .

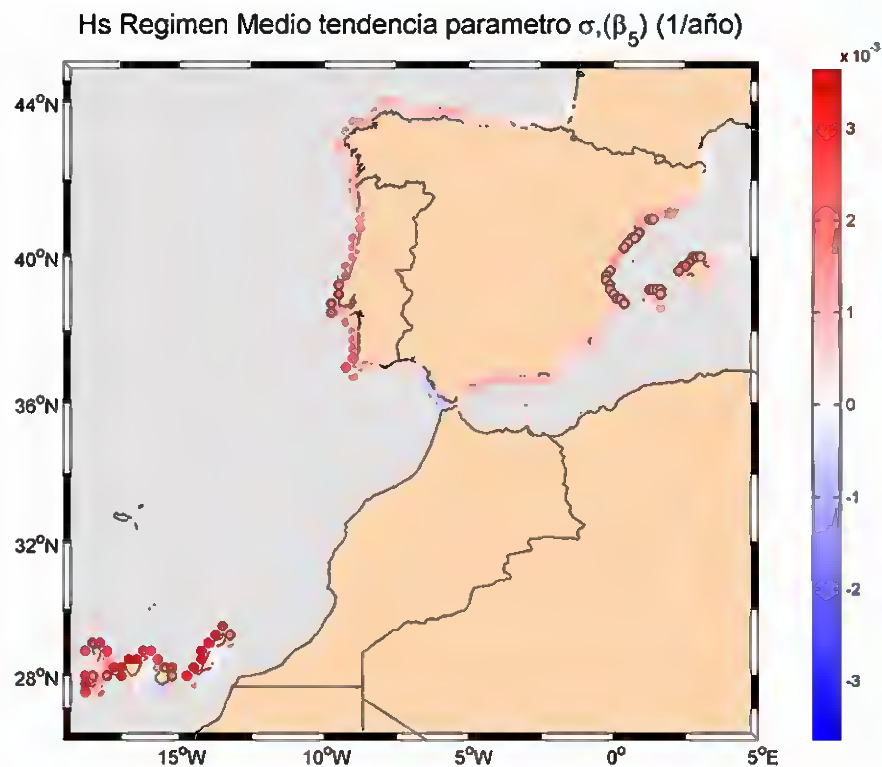


Figura 2 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de altura de ola significativa, parámetro  $\sigma(t)$ .



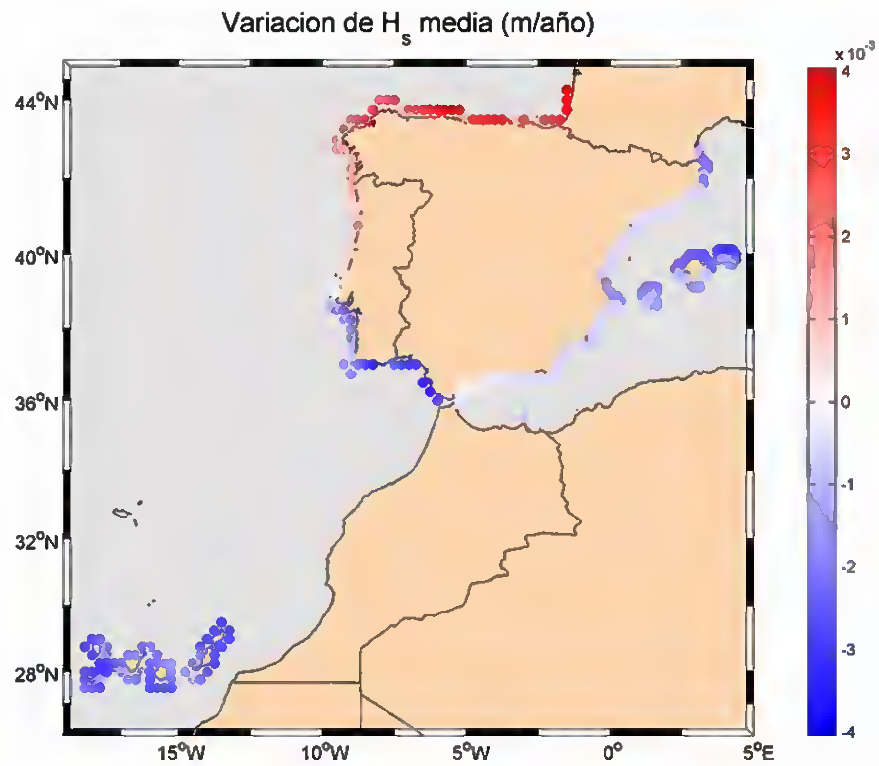


Figura 3 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de altura de ola significante media.

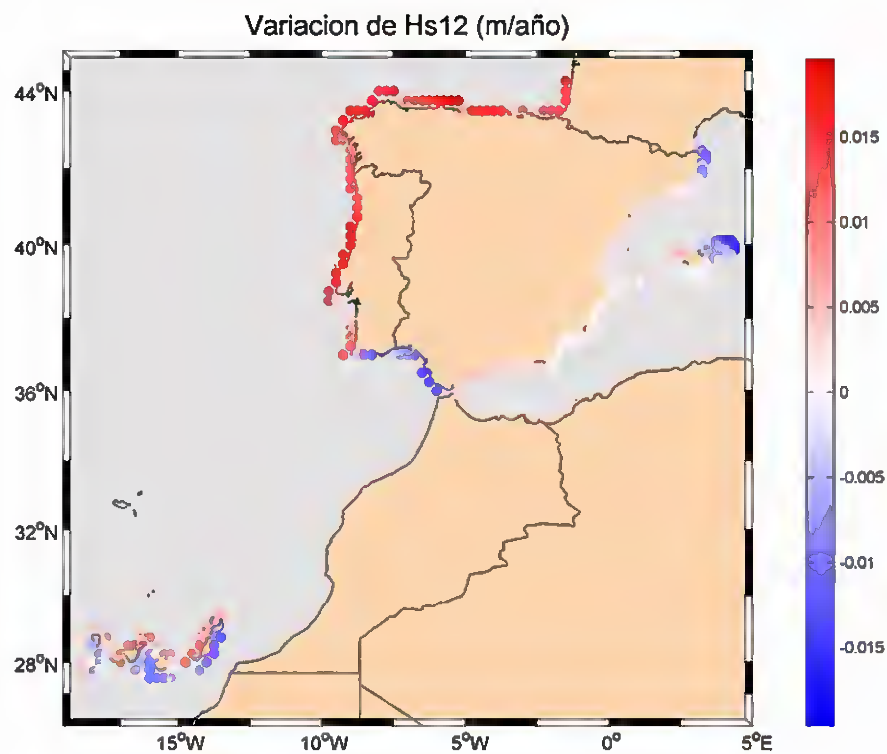


Figura 4 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de  $H_{s12}$ .



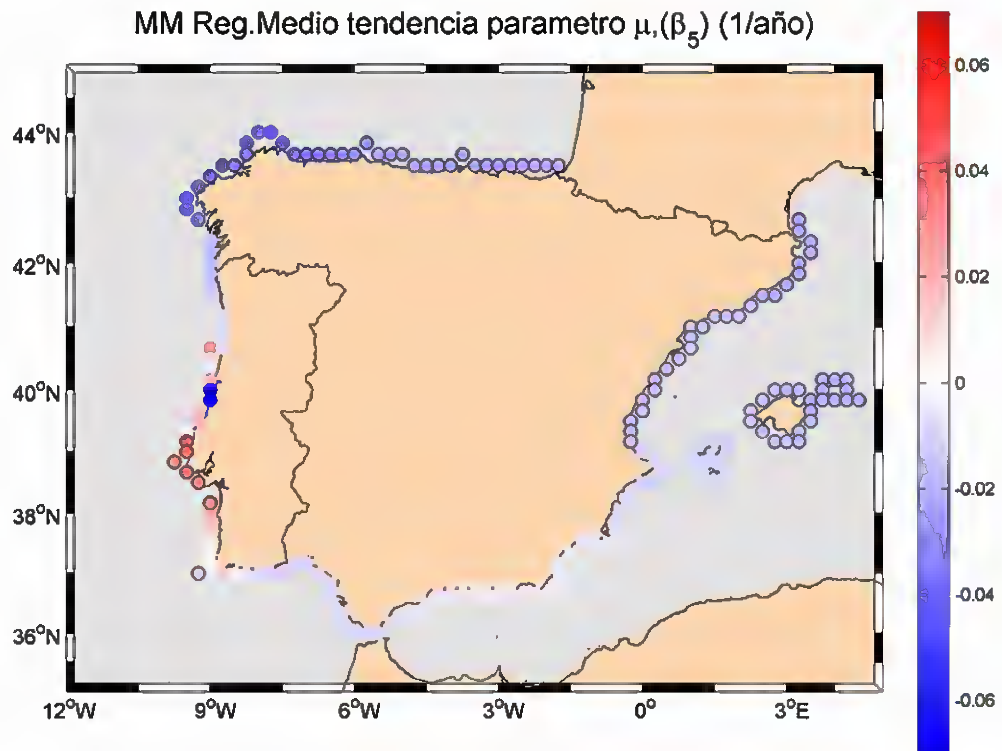


Figura 5 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de marea meteorológica, parámetro  $\mu(t)$ .

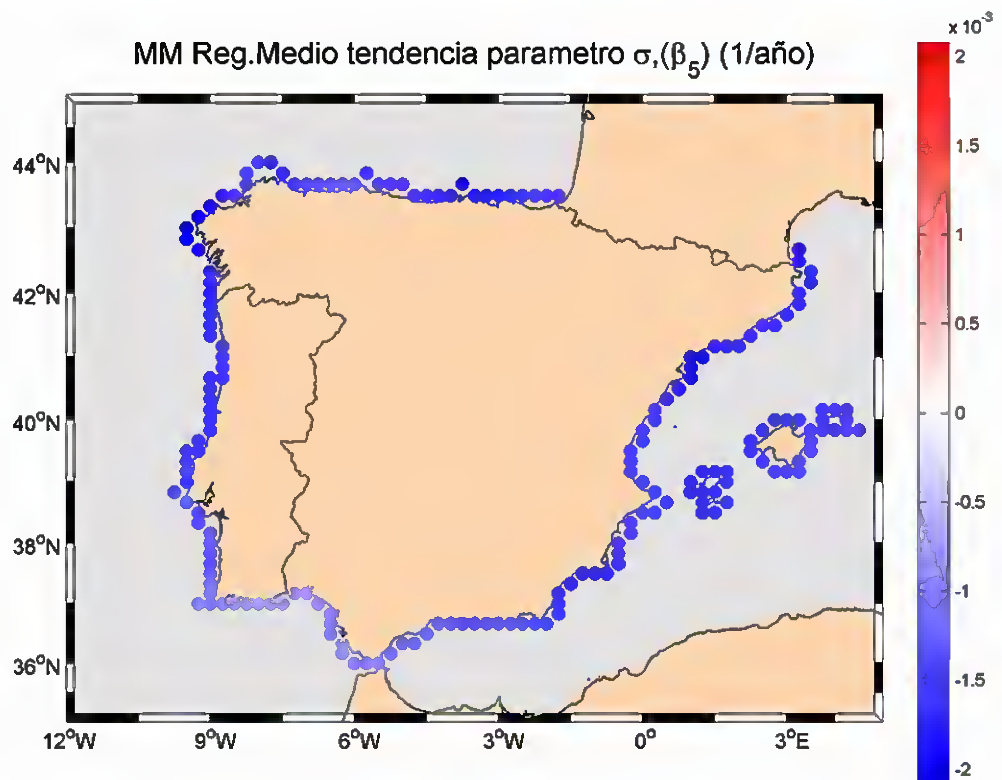


Figura 6 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de marea meteorológica, parámetro  $\sigma(t)$ .





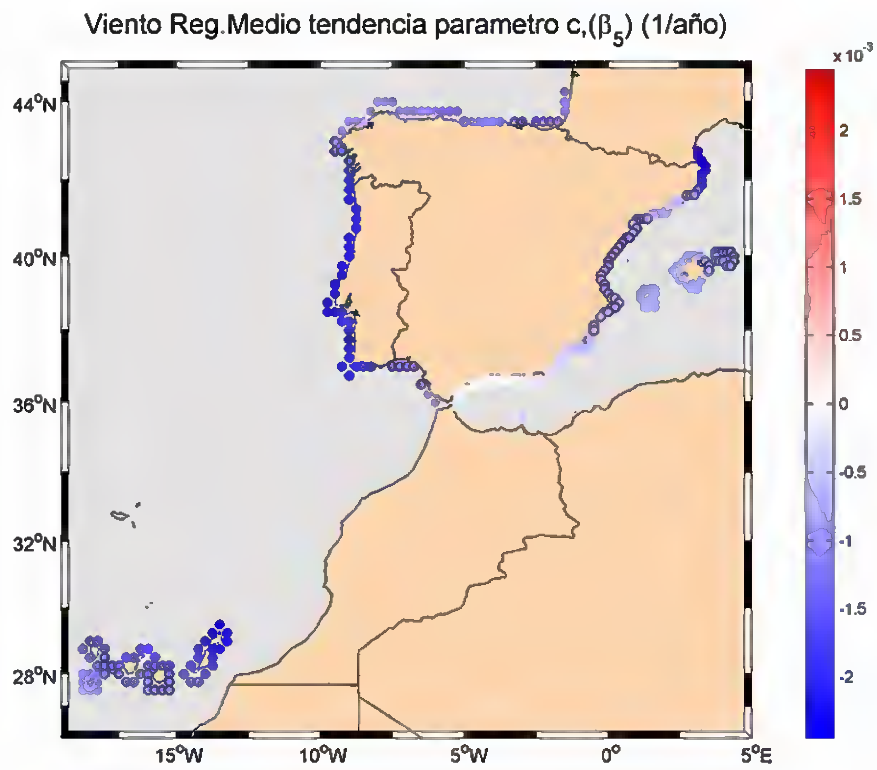


Figura 7 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de viento, parámetro  $c(t)$ .

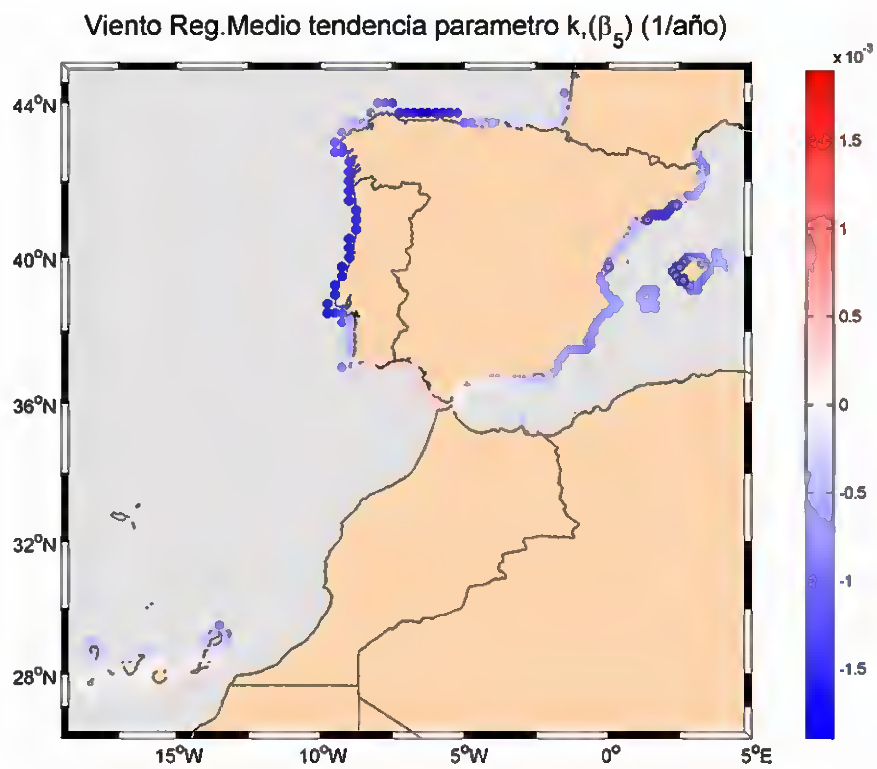


Figura 8 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio de viento, parámetro  $k(t)$ .



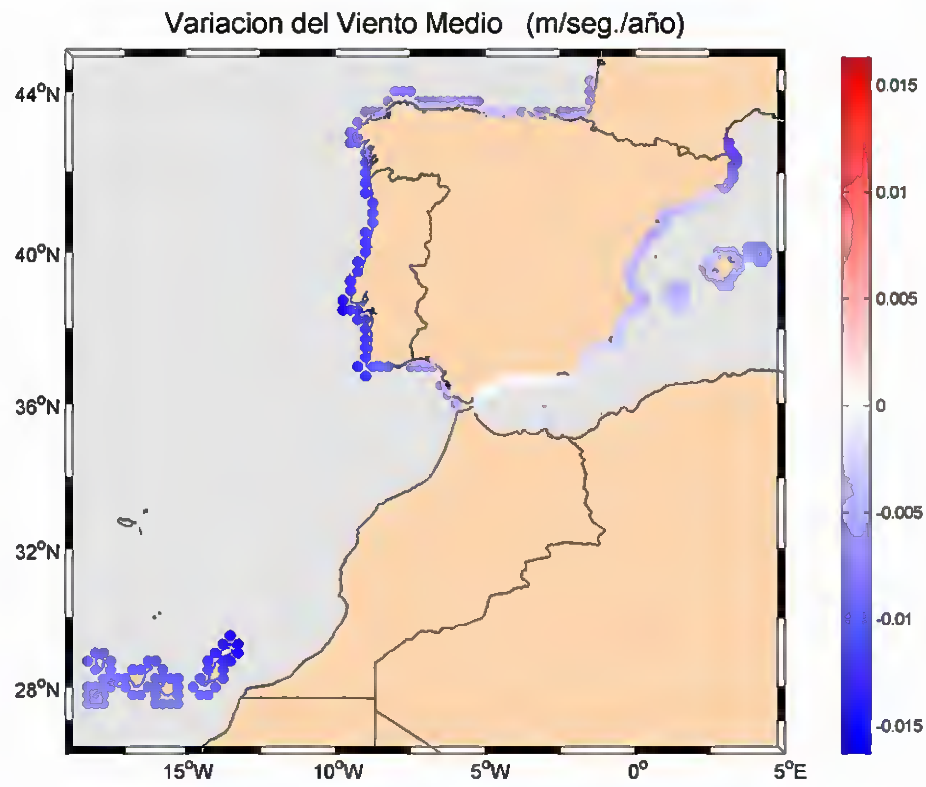


Figura 9 Resultados del análisis de tendencias del régimen medio del viento medio.



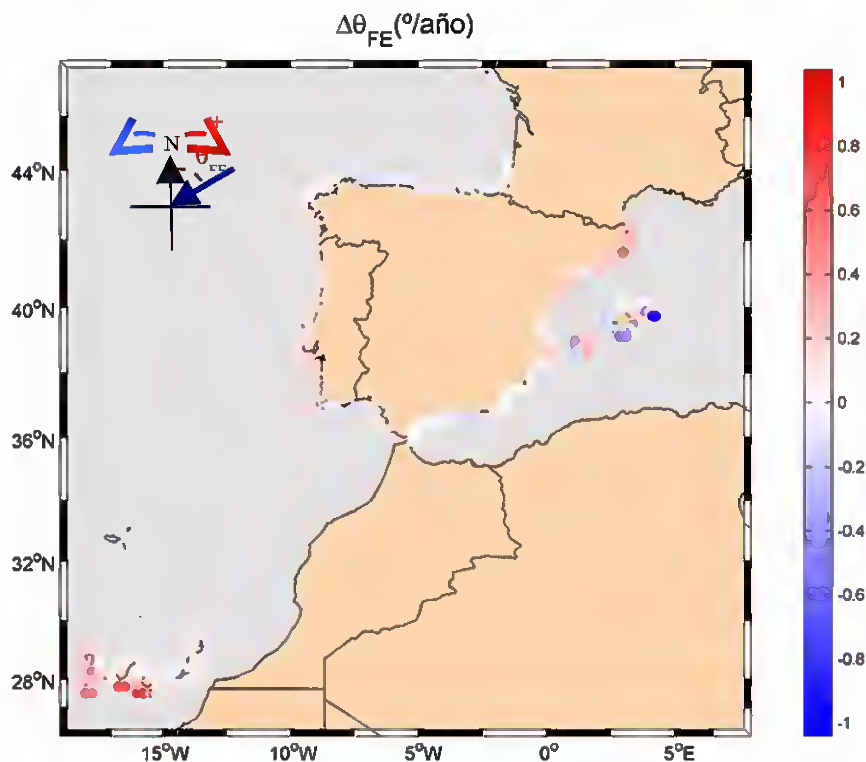


Figura 10 Resultados del análisis de tendencias de la dirección del flujo de energía del oleaje.

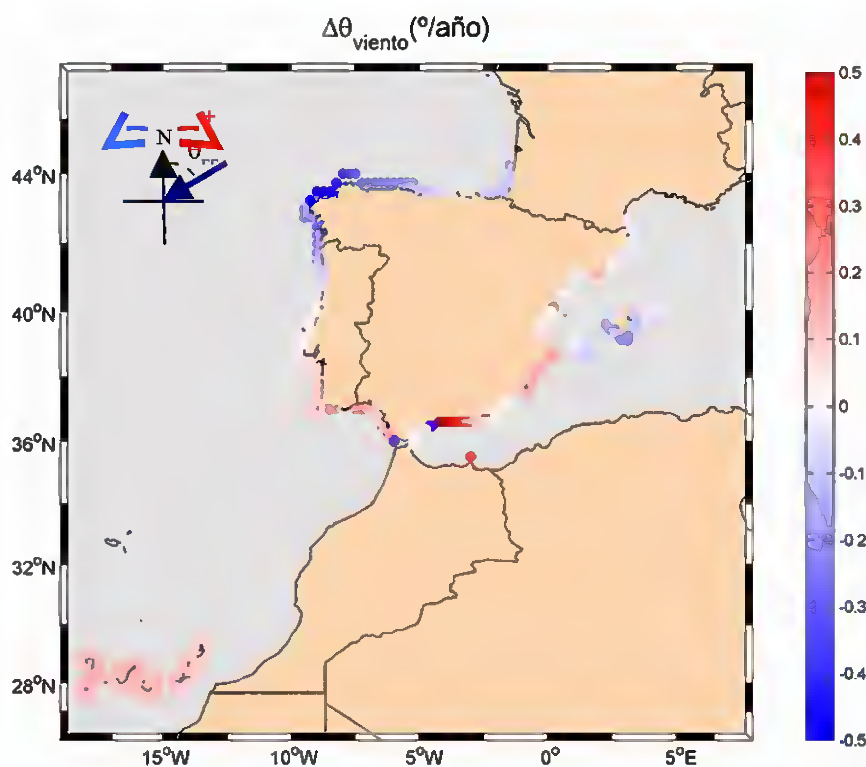


Figura 11 Resultados del análisis de tendencias de la dirección del transporte eólico.



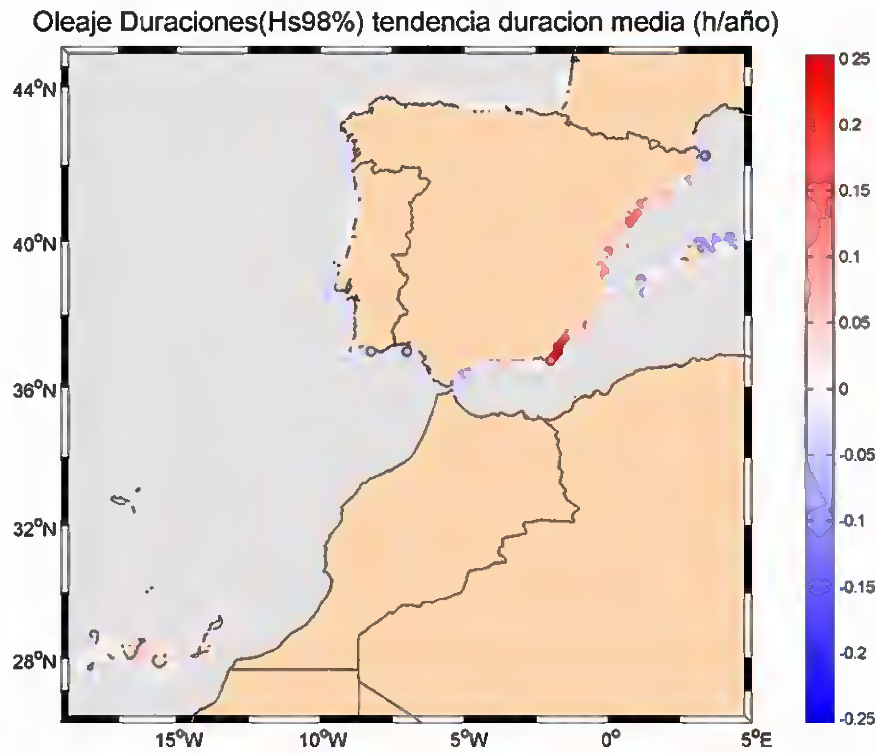


Figura 12 Resultados del análisis de tendencias de la duración media de oleaje.

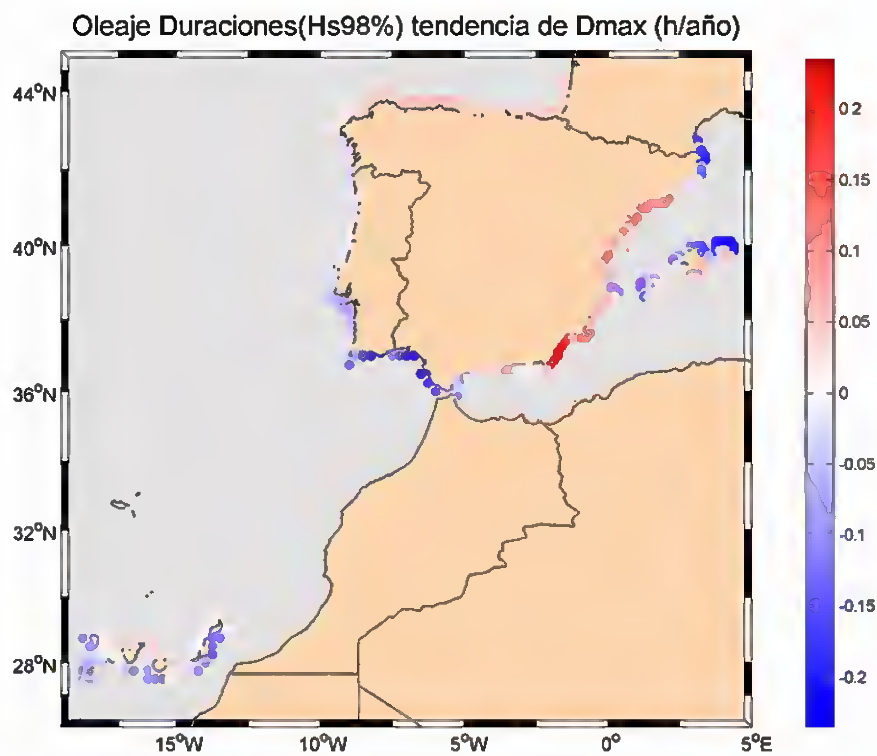


Figura 13 Resultados del análisis de tendencias de la duración máxima al año del oleaje.



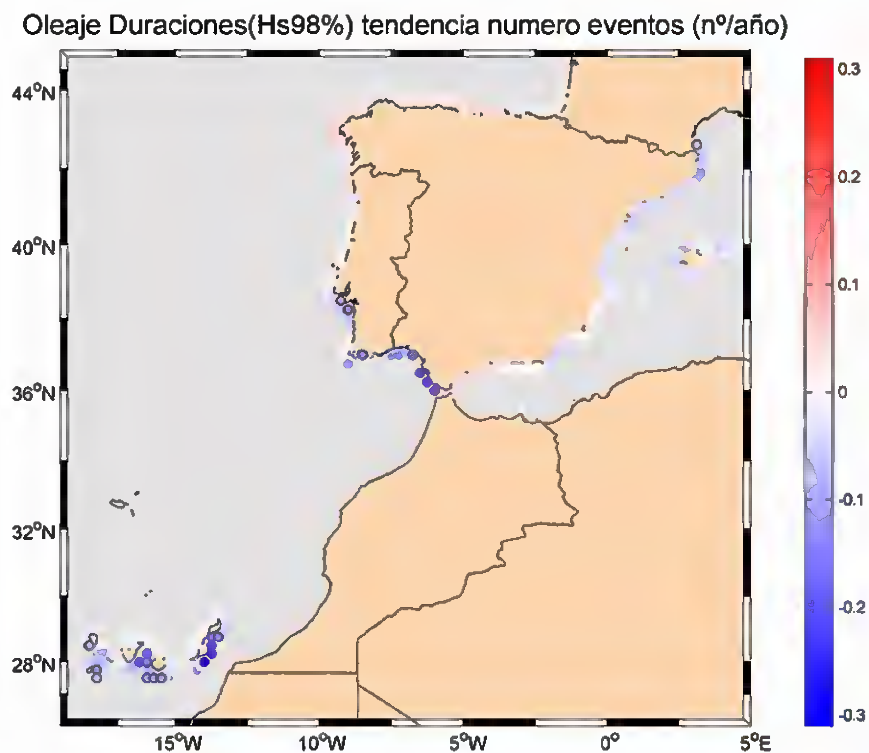


Figura 14 Resultados del análisis de tendencias del número de eventos al año relacionados con las duraciones que exceden del 98% del oleaje .

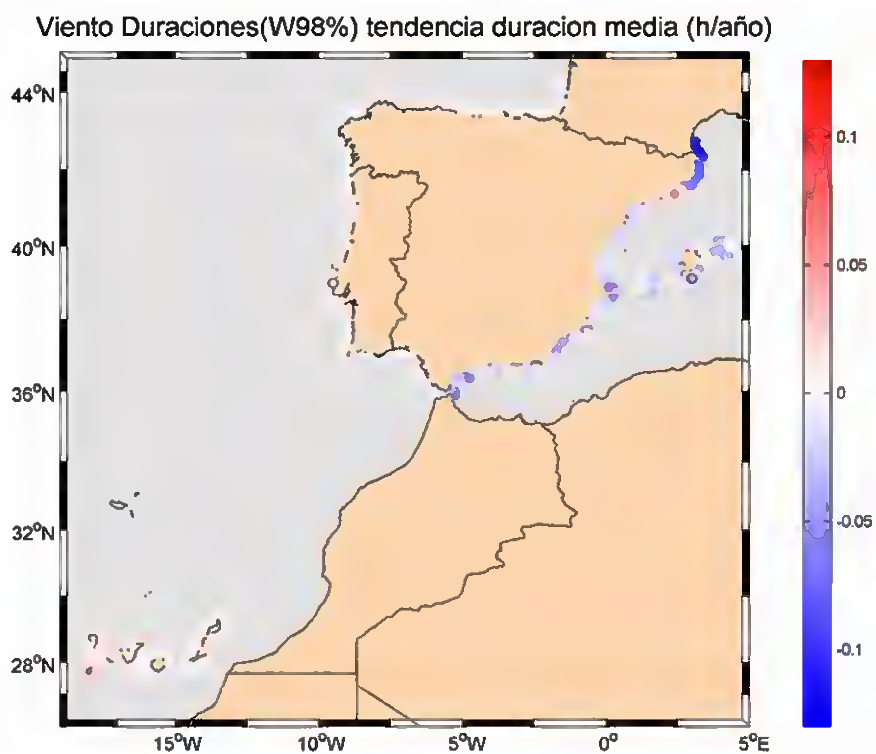


Figura 15 Resultados del análisis de tendencias de la duración media de velocidad del viento.



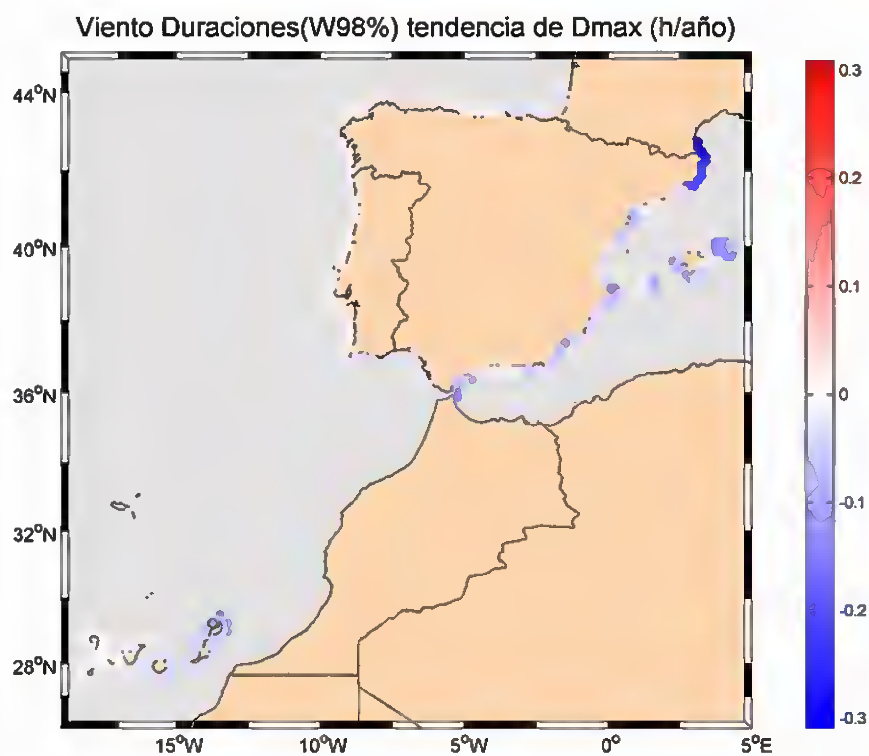


Figura 16 Resultados del análisis de tendencias de la duración máxima al año de la velocidad del viento.

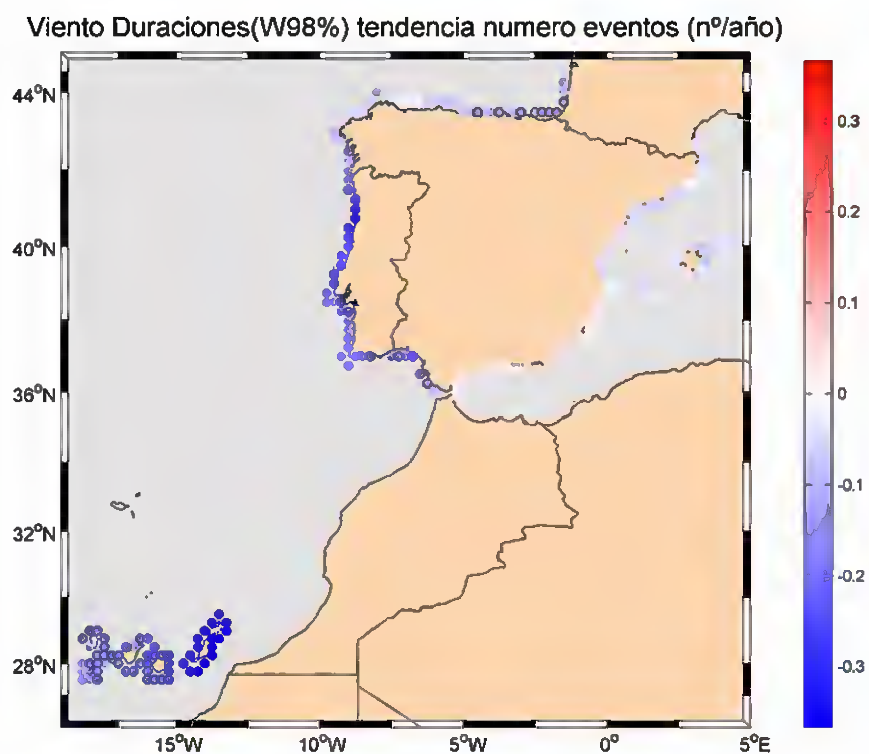


Figura 17 Resultados del análisis de tendencias del número de eventos al año relacionados con las duraciones que exceden del 98% de la intensidad del viento.







Hs Reg.Extremal Tasa anual de variacion de frecuencias, ( $\beta_f$ ) (1/año)

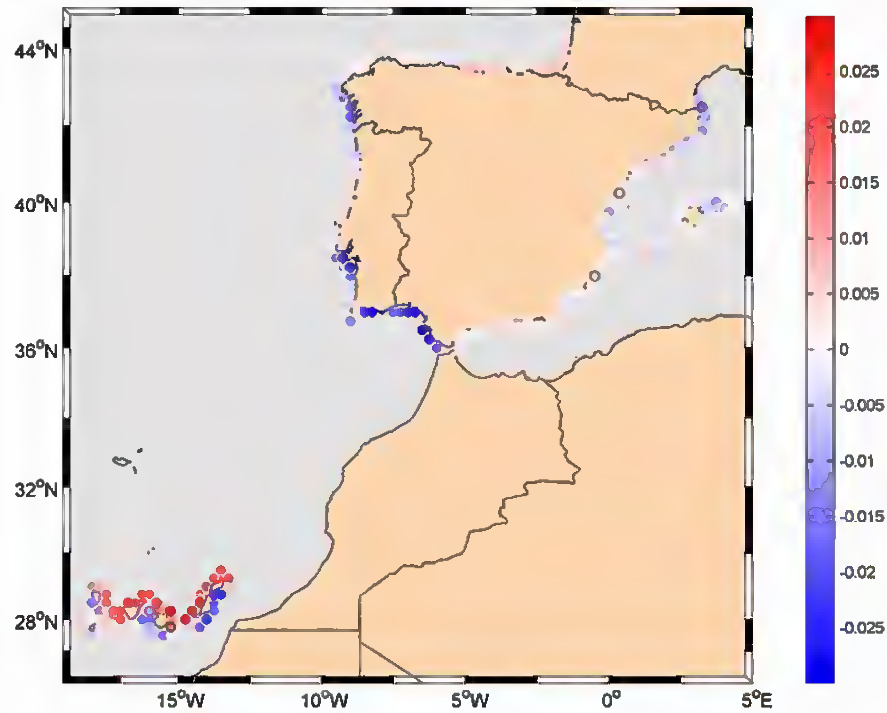


Figura 18 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias de altura de ola significativa.

Hs Regimen Extremal Variacion N° eventos/año

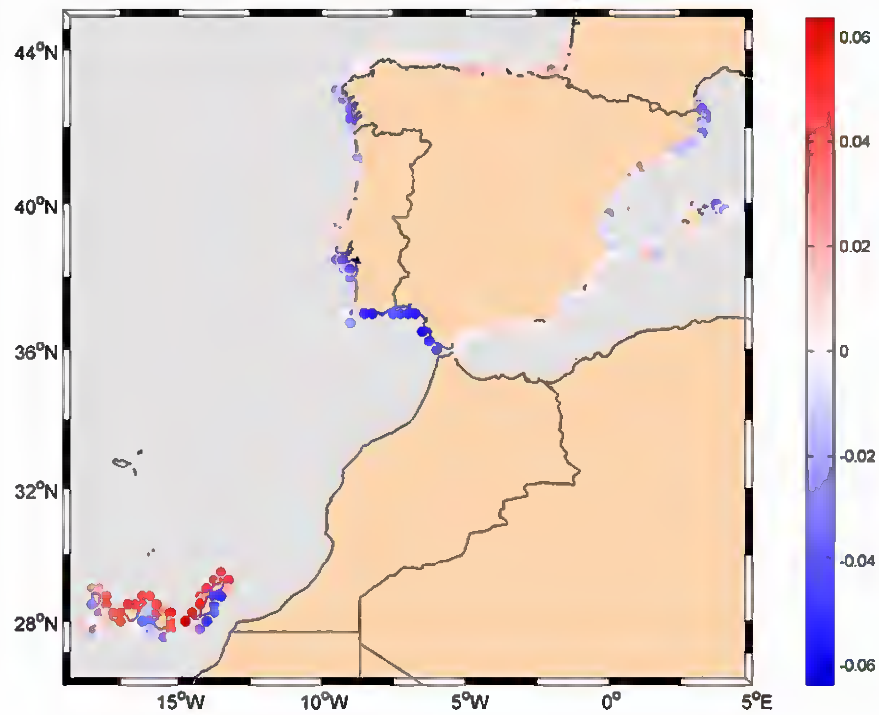


Figura 19 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias de altura de ola significativa.





Hs Reg.Extrema Tasa anual de variación de intensidades,  $(\beta_5)$  ( $^{\circ}$ /año)

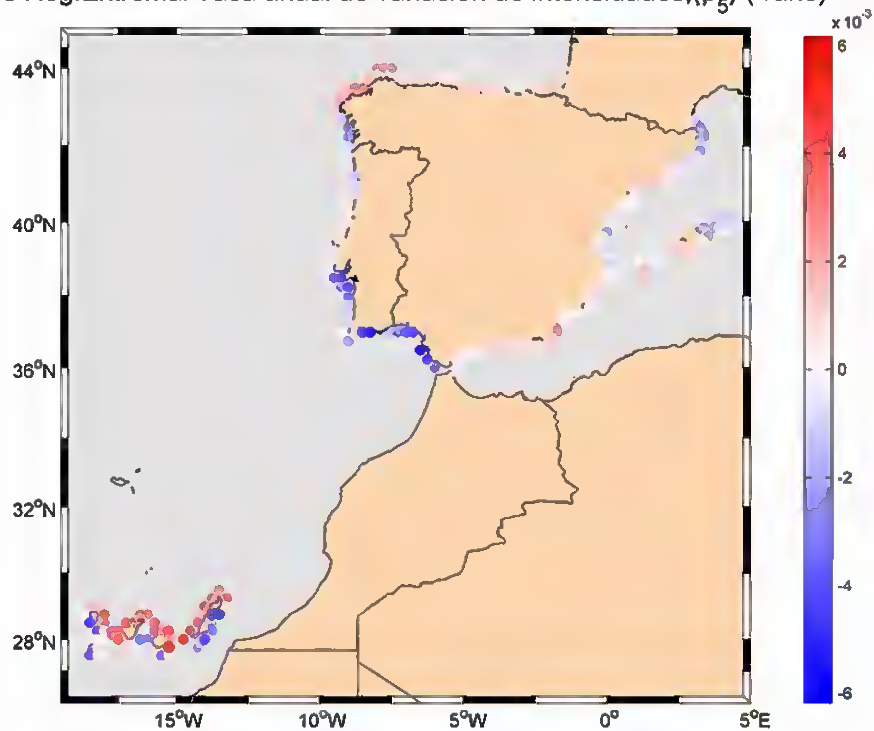


Figura 20 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de Intensidades de altura de ola significativa.





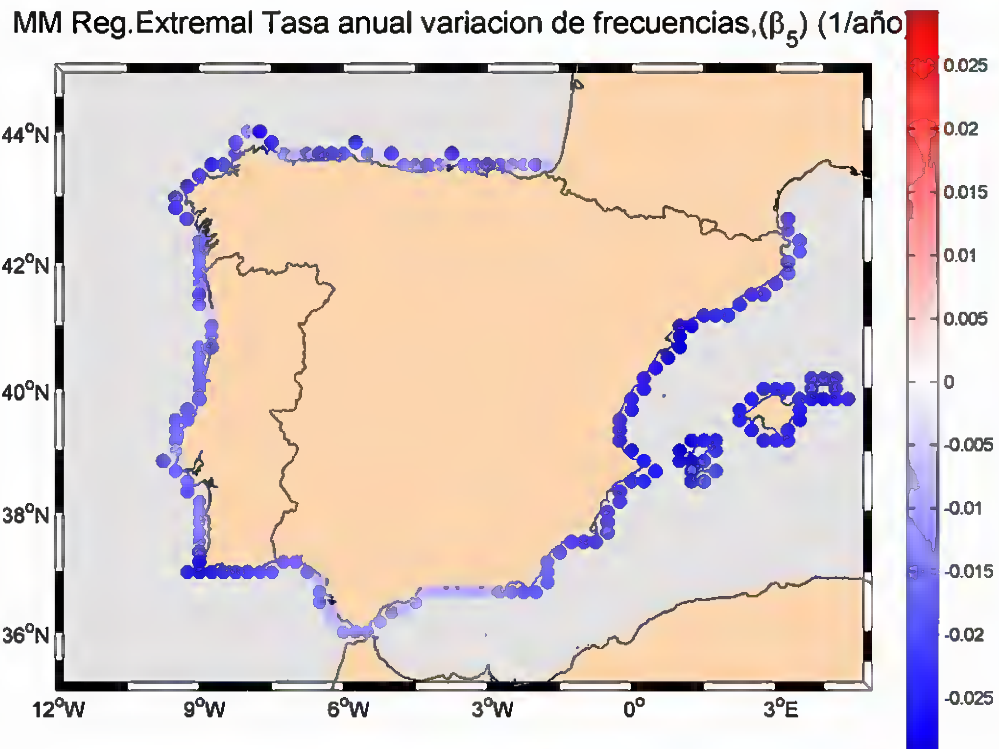


Figura 21 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias de marea meteorológica.



Figura 22 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de Intensidades de marea meteorológica.





Viento Reg.Extremal Tasa anual de variacion de frecuencias, ( $\beta_5$ ) (1/año)

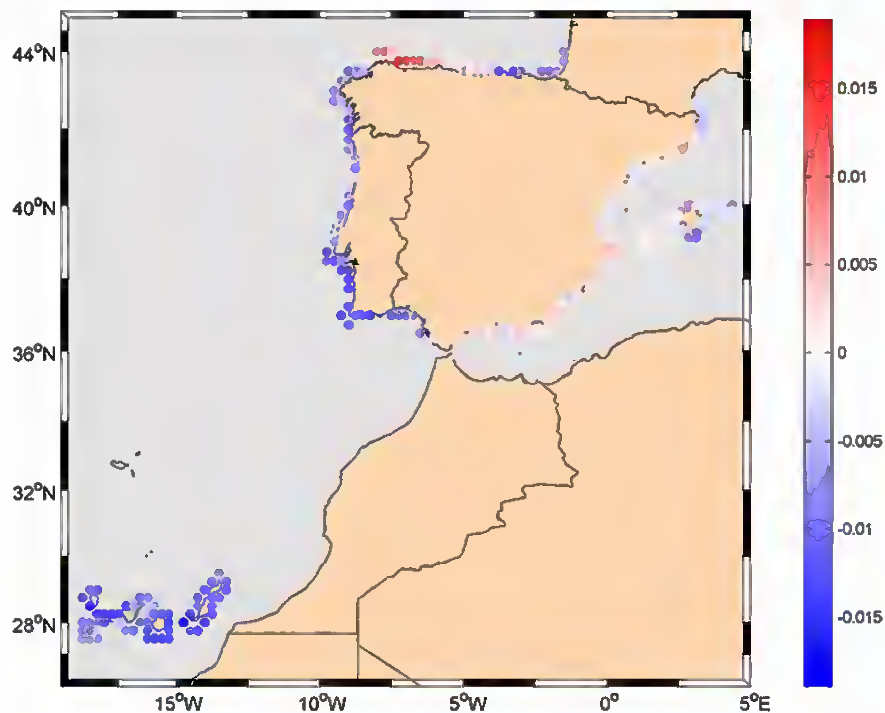


Figura 23 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de frecuencias de viento.

Viento Reg.Extremal Tasa anual variacion de Intensidades, ( $\beta_5$ ) ( $^{\circ}$ /año)

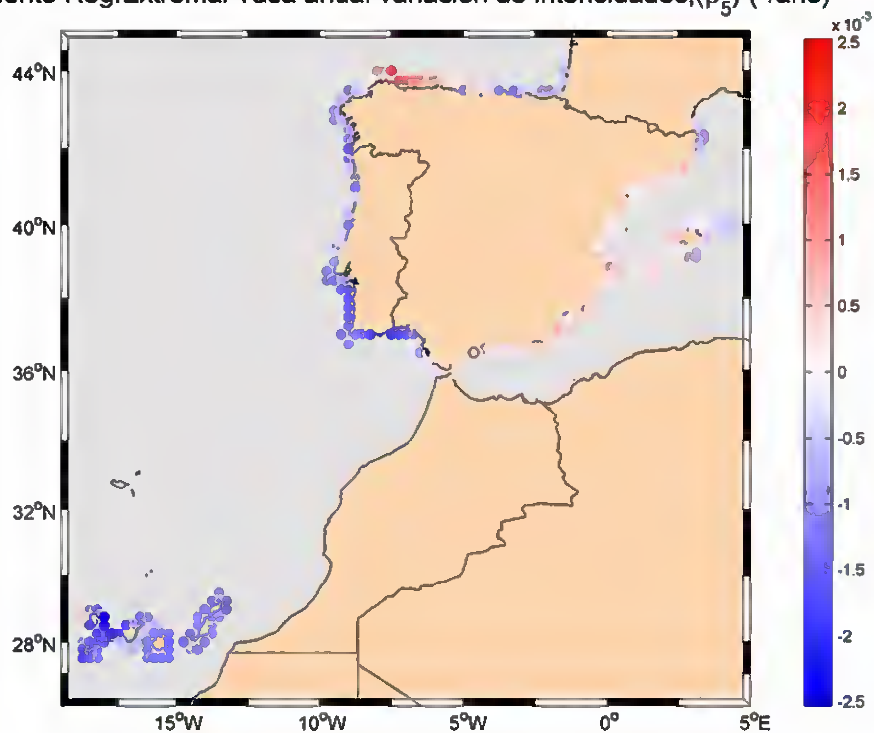


Figura 24 Resultados del análisis de tendencias del régimen extremal de intensidades de viento.

