

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE VALORES
EXTREMOS DE OLEAJE

Presentada por: CRISTINA IZAGUIRRE LASA

Dirigida por: FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA
IÑIGO J. LOSADA RODRIGUEZ

Octubre 2010

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Después de tanto tiempo, esfuerzo, estudio, dedicación y buenos y malos momentos esta etapa llega a su fin. Ha sido una etapa en la que además de aprender sobre playas, costas, estadística, clima marítimo, cambio climático... he aprendido sobre la vida: he crecido, madurado, reído, viajado y disfrutado de cada momento (¡incluso he aprendido a surfear!). Todo esto no hubiera sido posible sin la gente que me rodea y me quiere, a la que quiero agradecer su apoyo y ánimo durante este tiempo.

Primero quiero expresar mi más sincera gratitud a mis directores de tesis Fernando Méndez e Iñigo Losada. Ellos despertaron en mí la curiosidad por el mundo de la oceanografía con sus clases en cuarto de caminos y gracias a ellos he conseguido hacer este trabajo. Iñigo, gracias por haber confiado en mí desde el principio y haberme animado a entrar en este mundo. Gracias por tus consejos, tu claridad y tu buen hacer, que han dado calidad y rigor a este trabajo. Fernando, gracias por tu confianza, optimismo, buen humor, simpatía, ilusión, apoyo en los buenos y malos momentos, disponibilidad y compromiso, siempre. Gracias por transmitirme la ilusión por el mundo de las olas y la investigación, eres un excelente investigador y mejor persona.

Quiero agradecer la ayuda, el apoyo y el buen ambiente de trabajo a mis compañeros. En especial quiero dar las gracias a Melisa, Paula y Antonio Tomás por haberme dejado sus

programas, haberme transmitido sus conocimientos sobre extremos, técnicas de clasificación y oleaje en general y haberme ayudado siempre que lo he necesitado.

Para mí un apoyo muy importante han sido mis amigos, gracias a los cuales he podido disfrutar durante este tiempo y sentirme arropada, gracias a todos. Quiero dar las gracias especialmente a Romi que, a pesar de la distancia, día a día me ha animado en los buenos y malos momentos para seguir adelante. Mi otro gran apoyo ha sido Noelia, con la que llevo creciendo 24 años y con la que cada día aprendo cosas nuevas, ¡¡gracias por todo este tiempo!! Y también quiero agradecerle a Carol su apoyo y sus ánimos en estos últimos meses y a Yolanda las largas conversaciones, ánimo y cariño desde hace tantos años.

Por supuesto, mi mayor agradecimiento es para mis padres. Mi madre es la persona que me animó a probar suerte en el mundo de la investigación, por lo que esta tesis ha visto la luz por ella. Gracias a los dos por quererme tanto, valorarme y apoyarme incondicionalmente. Gracias a vosotros soy como soy y he conseguido las metas que me he propuesto. Y gracias a mis hermanos, Miguel y Leyre, por estar los tres tan unidos y apoyarnos siempre.

Y por último, quiero dar las gracias a Antonio, mi killo, mi chiki, por su cariño y comprensión. Por haberme enseñado tantas cosas sobre el mar y las playas que no se estudian en los libros. Y, sobre todo, por haberme enseñado a ver las cosas con otra perspectiva y a disfrutar de cada momento de la vida.

RESUMEN

Los fenómenos extremos de oleaje son eventos que se producen con poca frecuencia pero, sin embargo, tienen una importante repercusión desde el punto de vista socioeconómico y ambiental. El conocimiento del comportamiento de los extremos del oleaje es fundamental a la hora de diseñar rutas de barcos, infraestructuras costeras, mecanismos de extracción de energía, planes de gestión de la costa, estudiar comunidades bentónicas, etc. Estas actividades se desarrollan a distintas escalas, tanto espaciales como temporales, por lo que interesa un conocimiento del clima marítimo extremal en cada una de ellas. Esta tesis doctoral se ha centrado en el estudio de la variabilidad climática de los valores extremos de oleaje, abordando distintas escalas espaciales, en las que se tienen en cuenta los procesos físicos propios de cada una de ellas, y diferentes escalas temporales, como la estacional, interanual o el largo plazo. Para ello se han utilizado distintos modelos y técnicas estadísticas, combinándolos con el uso de modelos numéricos para el estudio en diferentes ámbitos espaciales y temporales.

La revisión del estado del arte ha puesto de manifiesto ciertas deficiencias en el estudio de la variabilidad climática de extremos del oleaje, que se han abordado a lo largo de esta tesis. En primer lugar se ha hecho una revisión y comparación de los distintos modelos estadísticos de extremos. El análisis se ha centrado en los modelos no estacionarios, con los que poder estudiar la variabilidad a distintas escalas temporales.

Se ha comparado un modelo GEV basado en máximos mensuales y un modelo Pareto-Poisson basado en el método POT a través del estudio del clima marítimo extremal en un punto del Atlántico Norte. Además, se han comparado dos modelos GEV basados en la selección de máximos de oleaje a distintas escalas temporales (mes y semana) con el objetivo de ver cuál es el más apropiado para estudiar el clima marítimo extremal en una zona compleja, como es Cádiz. Por otro lado, el uso de modelos paramétricos no estacionarios complejos ha puesto de manifiesto problemas de tiempo computacional. Para intentar reducir estos tiempos se han explorado y aplicado con éxito dos métodos automáticos de selección de parámetros, uno de los cuales reduce considerablemente los tiempos requeridos. El uso de distintas bases de datos instrumentales ha revelado la posible obtención de resultados erróneos derivados de la no homogeneidad en las series temporales de las bases de datos. Para solventar este problema se ha desarrollado un coeficiente de escala capaz de eliminar las posibles tendencias ficticias que inducen resultados erróneos. Con base en los resultados obtenidos de la comparación y análisis de distintos modelos estadísticos de extremos, se aporta una tabla de recomendaciones de uso de cada modelo en función del objetivo del estudio que se quiera llevar a cabo.

Uno de los principales objetivos de esta tesis ha sido el estudio de la variabilidad climática de los extremos de oleaje a escala global, regional y local. En primer lugar, se ha planteado un estudio de la variabilidad estacional e interanual de los extremos de oleaje en el globo terrestre mediante datos de satélite. Este análisis ha puesto de manifiesto patrones de oleaje extremal ligados a los procesos físicos de macroescala como huracanes o tormentas extratropicales. El estudio de la estacionalidad ha permitido obtener la variabilidad espacial de los extremos de oleaje en cada mes del año. La variabilidad interanual se ha estudiado a través de una serie de índices climáticos característicos de distintas zonas del globo, resultando la oscilación del Ártico, oscilación del Antártico y El Niño como los más influyentes en el clima marítimo extremal global.

El estudio de zonas más localizadas, donde los procesos de mesoescala son más influyentes, ha dado lugar al planteamiento del estudio a escala regional. En concreto se ha estudiado la variabilidad del clima marítimo extremal en el Sur de Europa y el Sur de América. En el Sur de Europa se han utilizado datos de satélite y se ha estudiado la variabilidad estacional e interanual, esta última a través de índices climáticos

característicos de la zona y mediante las anomalías de campos de presión a nivel del mar. El estudio del oleaje en Sudamérica se ha llevado a cabo mediante datos de reanálisis numérico, lo que ha permitido estudiar la tendencia de largo plazo media y por estaciones, además de la variación estacional.

En la escala local, el oleaje sufre una serie de procesos derivados de la propagación, como son la refracción, difracción, asomeramiento o rotura, condicionados por las características del fondo. A este nivel, se ha planteado un estudio de la variación espacial del clima marítimo extremal, por un lado, de profundidades indefinidas a profundidades reducidas y, por otro, de unas zonas a otras. Este análisis se ha aplicado en el litoral mediterráneo español y el Golfo de Cádiz. Además se ha estudiado las variaciones intra anuales y la tendencia de largo plazo en estas zonas en los últimos 20 años.

Por último, se ha planteado un nuevo enfoque del estudio de la variabilidad del clima marítimo extremal en un punto a través de la climatología sinóptica. Se han planteado tres escalas distintas para el corto, largo y muy largo plazo. En el corto plazo se combinan los tipos de tiempo de la zona de estudio, obtenidos mediante los campos de presiones medios 3-diarios y la técnica de clasificación SOM, con un modelo GEV que caracteriza el régimen extremal de oleaje correspondiente a cada tipo de tiempo. Para el estudio del largo plazo se presenta una metodología que combina los tipos de tiempo generadores de extremos de oleaje con un modelo de Pareto que caracteriza estos extremos. La agregación de las distintas funciones de distribución correspondientes a cada tipo de tiempo da lugar a la función de distribución extremal del punto de estudio. Finalmente, se plantea la escala del muy largo plazo con el objetivo de desarrollar una metodología que permita proyectar el régimen extremal de un punto a distintos escenarios de cambio climático mediante un *downscaling* estadístico. La metodología está basada en los tipos de tiempo de la zona de estudio y un modelo de Pareto que modela las intensidades de los extremos de oleaje. La agregación de los regímenes de las familias de oleaje que generan extremos en la zona permite obtener el régimen extremal anual del punto. Haciendo uso de las probabilidades de presentación de la SOM se puede proyectar el régimen extremal de oleaje a distintos escenarios. Las tres metodologías desarrolladas se han aplicado satisfactoriamente en tres puntos del Atlántico Norte caracterizados por distintos climas marítimos. Además, se han proyectados sus

correspondientes regímenes extremos de oleaje al siglo XXI para diversos escenarios del IPCC.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	XXI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXIII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XXVII
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Marco de la tesis	1
1.1.1 Circulación general del sistema climático	2
1.1.2 Variabilidad del sistema climático	5
1.1.3 Eventos extremos	6
1.1.4 Oleaje.....	9
1.1.5 Motivación	9
1.2 Estado del arte	11
1.2.1 Métodos estadísticos.....	12
1.2.2 Variabilidad espacial y temporal del clima marítimo	47
1.2.3 Proyecciones de clima marítimo extremal.....	51

1.3 Oportunidad de la tesis	52
1.4 Objetivos y metodología	54
1.5 Organización de la tesis	57
CAPITULO 2: DATOS DE PARTIDA	59
2.1 Introducción	59
2.2 Variables oceanográficas	61
2.2.1 Datos históricos de oleaje. Boyas	61
2.2.2 Datos históricos de oleaje. Satélite	62
2.2.3 Datos históricos de oleaje. Modelo numérico	64
2.2.4 Datos históricos de nivel del mar. Mareógrafos	67
2.3 Variables atmosféricas	68
2.3.1 Datos históricos de viento. Modelo numérico	68
2.3.2 Datos históricos de presión a nivel del mar. Modelo numérico	70
2.3.3 Datos de proyecciones de presión a nivel del mar. Modelo numérico	70
2.4 Variables atmósfera-océano	76
2.4.1 Índices climáticos	76
2.4.2 Síntesis de series temporales de índices climáticos	89
CAPITULO 3: AVANCES EN MODELOS ESTADÍSTICOS NO	
ESTACIONARIOS	91
3.1 Introducción.....	91
3.2 Métodos automáticos de selección de parámetros	92
3.2.1 Selección automática del modelo no estacionario	93

3.2.2 Selección pseudo-óptima de los parámetros del modelo no estacionario.....	95
3.3 Influencia de la homogeneidad de las series de datos	96
3.4 Comparación entre modelos no estacionarios GEV y Pareto-Poisson	100
3.4.1 Parametrización de los modelos.....	103
3.4.2 Modelo GEV mensual.....	104
3.4.3 Modelo POT con umbral variable.....	107
3.4.4 Comparación entre los modelos GEV mensual y POT con umbral variable..	111
3.5 Comparación entre modelos no estacionarios GEV mensual y GEV semanal.....	115
3.5.1 Parametrización de los modelos.....	117
3.5.2 Modelo GEV mensual	118
3.5.3 Modelo GEV semanal.....	122
3.5.4 Comparación entre los modelos GEV mensual y GEV semanal.....	126
3.6 Recomendaciones de uso de los distintos modelos de extremos.....	128

CAPITULO 4: VARIABILIDAD ESTACIONAL, INTERANUAL Y

TENDENCIAS DE LARGO PLAZO DEL CLIMA MARÍTIMO

EXTREMAL.....	131
4.1 Introducción	131
4.2 Análisis global.....	134
4.2.1 Datos de oleaje.....	134
4.2.2 Modelo estadístico	135
4.2.3 Climatología del clima marítimo extremal global	137
4.2.4 Variabilidad interanual del clima marítimo extremal global.....	141

4.2.5 Conclusiones.....	152
4.3 Análisis regional: sur de Europa.....	153
4.3.1 Bases de datos.....	154
4.3.2 Modelo estadístico.....	155
4.3.3 Climatología del clima marítimo extremal.....	159
4.3.4 Variabilidad interanual del clima marítimo extremal.....	163
4.3.5 Conclusiones.....	171
4.4 Análisis regional: América del Sur.....	172
4.4.1 Datos de oleaje.....	172
4.4.2 Modelo estadístico.....	173
4.4.3 Climatología del clima marítimo extremal.....	178
4.4.4 Tendencia de largo plazo.....	182
4.4.5 Conclusiones.....	188
4.5 Conclusiones.....	189
CAPITULO 5: ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO EXTREMAL EN AGUAS SOMERAS.....	191
5.1 Introducción.....	191
5.2 Metodología para el estudio del clima marítimo extremal en aguas someras.....	192
5.2.1 Bases de datos utilizadas.....	194
5.2.2 Definición de las mallas.....	201
5.2.3 Calibración de la base de datos de oleaje.....	202
5.2.4 Clasificación y selección.....	209
5.2.5 Propagación del oleaje a aguas someras.....	220
5.2.6 Reconstrucción de series temporales horarias.....	226
5.2.7 Validación de las series temporales horarias.....	231

5.3 Caracterización del clima marítimo extremal	233
5.3.1 Modelo estadístico	234
5.3.2 Variación intra anual de los extremos de oleaje	239
5.3.3 Tendencia de largo plazo de los extremos de oleaje	248
5.4 Conclusiones	250
CAPITULO 6: RÉGIMEN EXTREMAL EN FUNCIÓN DE PATRONES DE TIEMPO.....	253
6.1 Introducción.....	253
6.2 Puntos de estudio.....	255
6.3 Climatología sinóptica.....	257
6.3.1 Escala espacial	258
6.3.2 Escala temporal.....	258
6.3.3 Patrones de tiempo	259
6.4 Predicción a corto plazo: Régimen extremal de oleaje basado en un modelo GEV	266
6.5 Predicción a largo plazo: Régimen extremal de oleaje basado en el método POT	279
6.5.1 Selección de los eventos extremos: método POT.....	281
6.5.2 Situaciones sinópticas de estudio	282
6.5.3 Regímenes extremales de oleaje para cada situación sinóptica.....	295
6.5.4 Régimen extremal anual de oleaje	301
6.6 Predicción a muy largo plazo: Régimen extremal de oleaje basado en el método POT	304

6.6.1 Régimen extremal para las situaciones sinópticas generadoras de extremos de oleaje	306
6.6.2 Régimen extremal anual de oleaje	311
6.7 Proyecciones de clima marítimo extremal	316
6.7.1 Escenarios de cambio climático y modelos globales	317
6.7.2 Proyecciones de clima marítimo extremal. Punto Norte.....	328
6.7.3 Proyecciones de clima marítimo extremal. Coruña	332
6.7.4 Proyecciones de clima marítimo extremal. Cádiz.....	336
6.7.5 Discusión.....	340
6.8 Conclusiones	344
CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE	
INVESTIGACIÓN	347
7.1 Conclusiones	347
7.1.1 Resumen de aportaciones.....	348
7.1.2 Resumen de resultados.....	351
7.2 Futuras líneas de investigación.....	352
BIBLIOGRAFÍA	355

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 Circulación general de la atmósfera. Fuente: NASA.....	3
Figura 1.2 Esquema de las principales corrientes marinas. Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Corriente_marina	4
Figura 1.3 Funciones de densidad de temperatura y precipitación diarias. Fuente: Weather and Climate Extremes in a Changing Climate (U.S. Climate Change Science Program, Synthesis and Assessment Product 3.3, 2008)	6
Figura 1.4 Variaciones en la función de densidad de las variables temperatura diaria y precipitación. Fuente: Weather and Climate Extremes in a Changing Climate (U.S. Climate Change Science Program, Synthesis and Assessment Product 3.3, 2008).....	8
Figura 1.5 Serie temporal de oleaje procedente de satélite.....	32
Figura 1.6 Esquema conceptual de la tesis	56

Capítulo 2

Figura 2.1 Localización de las boyas de las redes de Puertos del Estado y la red Xiom..	62
Figura 2.2 Información sobre las distintas misiones satelitales disponibles. Fuente: http://www.aviso.oceanobs.com/	63
Figura 2.3 Trayectorias del satélite Geosat Follow-On (GFO).....	64

Figura 2.4 Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator)	66
Figura 2.5 Rejilla de la Región Mediterránea del reanálisis GOW 2.1. Resolución de 0.125º (representación de la figura en proyección Mercator)	66
Figura 2.6 Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global 1.5º × 1.0º, Malla Iberia 0.5º y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0.1º (representación de la figura en proyección Mercator).....	67
Figura 2.7 Localización de los mareógrafos utilizados en este trabajo.	68
Figura 2.8 Esquema de los escenarios IE-EE. Fuente: Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones.....	72
Figura 2.9 Emisiones anuales totales de CO ₂ para cada familia y grupos de escenarios. Fuente: Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones.....	74
Figura 2.10 Características de los modelos climáticos globales. Fuente: http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro.pdf	76
Figura 2.11 Efecto de las fases positiva (imagen izquierda) y negativa (imagen derecha) del AO. Fuente: NASA	77
Figura 2.12 EOF 1 del neopotencial de 850 hPa entre el polo sur y los 20ºS.....	78
Figura 2.13 Anomalías de presión en el Pacífico bajo situaciones de Niño y Niña. Fuente: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/soilink.shtml	79
Figura 2.14 Esquema de la situación de vientos y estructura oceánica en condiciones normales del fenómeno ENSO en los meses de Diciembre a Febrero. Fuente: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensocycle/meanrain.shtml	80
Figura 2.15 Esquema de la situación de vientos y estructura oceánica en fase Niño y fase Niña. Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/El_Niño-Southern_Oscillation	81
Figura 2.16 Regiones de medida de los índices Niño. Fuente: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//tropics/enso.htm	81
Figura 2.17 Evolución del índice NIÑO 3.4 (panel superior) y el SOI (panel inferior) en el mismo período de tiempo. Fuente: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//tropics/enso.htm	82
Figura 2.18 Fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la NAO	85

Figura 2.19 Fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) del IOD. Fuente: <http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/dl/iod/>87

Figura 2.20 Anomalías de temperatura superficial del agua en el océano Índico en la fase positiva del IOD en Noviembre de 1997. Fuente: http://www.bom.gov.au/climate/IOD/about_IOD.shtml.....88

Figura 2.21 Series temporales de los índices climáticos utilizados como predictores en esta tesis.....89

Capítulo 3

Figura 3.1 Número de medidas para cada misión satelital 96

Figura 3.2 Ajuste del modelo GEV con factor de escala a distintas poblaciones de extremos y tendencias obtenidas100

Figura 3.3 Localización del punto NA (15°W,55°N)101

Figura 3.4 *Boxplot* de la H_s máxima mensual en el punto 15W55N102

Figura 3.5 Serie temporal de oleaje en el punto 15°W,55°N (puntos grises) y máximos mensuales (línea negra)104

Figura 3.6 Máximos mensuales, parámetros de localización y escala y cuantil asociado a un período de retorno de 20 años.....105

Figura 3.7 Diagnóstico gráfico PP y QQ plot106

Figura 3.8 Cuantil instantáneo asociado a período de retorno 50 años (línea negra) y máximos mensuales (cruces rojas)107

Figura 3.9 Umbral variable y excedencias de oleaje en el punto 15W55N108

Figura 3.10 Excedencias sobre umbral variable, parámetros de localización y escala y cuantil asociado a un período de retorno de 20 años109

Figura 3.11 Diagnóstico gráfico PP y QQ *plot* para el modelo de intensidades y frecuencias.....110

Figura 3.12 Cuantil asociado a período de retorno 50 años (línea negra) y excedencias de altura de la (cruces rojas)..... 111

Figura 3.13 Poblaciones de datos de los modelos GEV mensual y POT con umbral variable.....112

Figura 3.14 Comparación de cuantiles de período de retorno 50 años obtenidos con el modelo GEV mensual y POT 114

Figura 3.15 Comparación de cuantiles de período de retorno 50 años obtenidos con el modelo GEV mensual y POT. Años 1960-1990	114
Figura 3.16 Localización del punto CA en el Golfo de Cádiz	115
Figura 3.17 Serie temporal de H_s (puntos grises) y máximos anuales (círculos negros)	116
Figura 3.18 <i>Boxplot</i> de la H_s máxima mensual en el punto 15W55N.....	117
Figura 3.19 Rosa de oleaje de los eventos extremos de máximos mensuales. Cádiz. Este reanálisis de oleaje está cerrado en el contorno Este (Estrecho de Gibraltar).....	119
Figura 3.20 Máximos mensuales, parámetros de localización y escala y cuantil asociado a un período de retorno de 20 años.....	120
Figura 3.21 Diagnóstico gráfico PP y QQ plot.....	121
Figura 3.22 Cuantil instantáneo asociado a período de retorno 50 años (línea negra) y máximos mensuales (cruces rojas)	122
Figura 3.23 Ejemplos de campos de presiones medios semanales.....	123
Figura 3.24 Máximos semanales, parámetros de localización y escala y cuantil asociado a un período de retorno de 20 años.....	123
Figura 3.25 Variación anual del parámetro de forma	124
Figura 3.26 Diagnóstico gráfico PP y QQ plot	125
Figura 3.27 Cuantil instantáneo asociado a período de retorno 50 años (línea negra) y máximos semanales (cruces rojas).....	126
Figura 3.28 Comparación de cuantiles de período de retorno 50 años obtenidos con el modelo GEV mensual y GEV semanal	127
Figura 3.29 Comparación de cuantiles de período de retorno 50 años obtenidos con el modelo GEV mensual y GEV semanal. Años 1960-1990	127

Capítulo 4

Figura 4.1 Variación espacial del parámetro de forma del modelo GEV mensual. La significancia estadística menor del 10 % está representada por un asterisco en el centro de cada celda.....	138
Figura 4.2 Variabilidad espacial de la $H_{s_{20}}$ (m) anual, calculada para cada mes a partir del modelo estacional ajustado a cada celda del dominio	140
Figura 4.3 Variabilidad espacial de la influencia de los índices AO y SAM en el parámetro de localización (cm/unidad de índice). El nivel de confianza menor del 10 % está representado por un asterisco en el centro de cada celda.....	142

Figura 4.4 Variabilidad espacial de la influencia de los índices NINO3, PNA, WP y EP/NP en el parámetro de localización (cm/unidad de índice). El nivel de confianza menor del 10 % está representado por un asterisco en el centro de cada celda144

Figura 4.5 Variabilidad espacial de la influencia de los índices NAO, EA, EA/WR y SCA en el parámetro de localización (cm/unidad de índice). El nivel de confianza menor del 10 % está representado por un asterisco en el centro de cada celda.....146

Figura 4.6 Variabilidad espacial de la influencia de los índices IOD y QBO en el parámetro de localización (cm/unidad de índice). El nivel de confianza menor del 10 % está representado por un asterisco en el centro de cada celda.....148

Figura 4.7 Variabilidad espacial de la influencia del índice NIÑO 3 con diferentes desfases ($\tau = +4, +2, 0, -2, -4$ meses) en el parámetro de localización (cm/unidad de índice). El nivel de confianza menor del 10 % está representado por un asterisco en el centro de cada celda150

Figura 4.8 Localización del área de estudio del sur de Europa 155

Figura 4.9 *Boxplot* de H_s máxima mensual en una celda del área de estudio 156

Figura 4.10 Máximos mensuales de H_s , parámetro de localización (línea gris) y parámetro de localización más escala (línea negra) ajustados para los datos de la celda situada en la esquina superior izquierda del dominio (30°W, 48°N). 157

Figura 4.11 Variabilidad espacial mes a mes del parámetro de localización del modelo GEV mensual.....159

Figura 4.12 Variabilidad espacial mes a mes del parámetro de escala del modelo GEV mensual.....160

Figura 4.13 Diagnóstico gráfico del ajuste del modelo estacional para los datos de la celda situada en la esquina superior izquierda del dominio (30°W, 48°N)161

Figura 4.14 Variabilidad espacial del $H_{s_{30}}$ mensual (m).....162

Figura 4.15 Series temporales de los índices NAO, EA, EA/WR y SCA164

Figura 4.16 EOFs de las anomalías de presión a nivel del mar en el área del Atlántico norte. Los números entre paréntesis representan el porcentaje de varianza explicada por cada modo.....165

Figura 4.17 PCs estandarizadas de las anomalías de presión a nivel del mar en el área del Atlántico norte.....166

Figura 4.18 Variabilidad espacial de la influencia de los índices climáticos en el parámetro de localización (cm/unidad de índice) 167

Figura 4.19 Variabilidad espacial de la influencia de las PCs de las anomalías de presión a nivel del mar en la zona NA en el parámetro de localización (cm/unidad de índice).	169
Figura 4.20 Localización de 6 puntos en la zona de estudio para un primer análisis descriptivo.....	174
Figura 4.21 Máximos mensuales de H_s (DEF=azul, MAM=verde, JJA=rojo y SON=marrón), parámetro de localización (línea negra discontinua) y parámetro de localización más escala (línea negra) en 6 puntos del dominio.....	175
Figura 4.22 Ejemplo del efecto que produce la onda en la tendencia de largo plazo	178
Figura 4.23 Variación espacial del parámetro de forma (ξ_0). Solo están representados los puntos cuya significancia estadística es menor del 5 %.....	179
Figura 4.24 Variabilidad espacial de la $H_{s_{100}}$ (m) anual, calculada para cada mes a partir del modelo estacional ajustado a cada punto del dominio.....	180
Figura 4.25 Diagnóstico gráfico del modelo estacional ajustado en el punto de las Malvinas.....	182
Figura 4.26 Tendencia media de largo plazo (cm/año) en los puntos con significancia estadística igual o superior al 95%.....	183
Figura 4.27 Diagnóstico gráfico del modelo con tendencia de largo plazo lineal ajustado en el punto de Florianópolis.....	184
Figura 4.28 Variación de la tendencia de largo plazo en el parámetro de localización a lo largo del año (línea negra) y los valores medios por estación (DEF=azul, MAM=verde, JJA=rojo, SON=marrón).....	185
Figura 4.29 Tendencia de largo plazo media por estaciones (cm/año) en los puntos con significancia estadística igual o superior al 95%.....	186
Figura 4.30 Diagnóstico gráfico del modelo con tendencia de largo plazo lineal ajustado en el punto de Guayaquil	188

Capítulo 5

Figura 5.1 Metodología para la transferencia de oleaje de aguas profundas a aguas someras y caracterización del clima marítimo extremal	194
Figura 5.2 Batimetría utilizada	195
Figura 5.3 Localización de las boyas utilizadas en el estudio	196
Figura 5.4 Series temporales horarias de altura de ola significativa, periodo medio, periodo de pico y dirección del pico de la boya de Tordera.....	197

Figura 5.5 Distribución espacial de diversas bases de datos de satélites	198
Figura 5.6 Localización de los mareógrafos utilizados en este trabajo	198
Figura 5.7 Mallas de propagación	201
Figura 5.8 Puntos calibrados	203
Figura 5.9 Datos de satélite (puntos azules) utilizados para la calibración de un punto de Ibiza (punto rojo)	204
Figura 5.10 Cuantiles de altura de ola seleccionados para la calibración en el punto de Ibiza	206
Figura 5.11 Rosa de calibración de H_s obtenida para GOW en el punto seleccionado de Ibiza	207
Figura 5.12 Diagramas QQplot con las alturas de ola instrumentales (satélite) versus GOW calibrado y sin calibrar. Punto de Ibiza	208
Figura 5.13 Valor medio del coeficiente de corrección y valor máximo de altura de ola (línea negra) por direcciones. Punto de Ibiza	209
Figura 5.14 Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección de los casos representativos del clima marítimo en profundidades indefinidas mediante MaxDiss para el caso de la malla GM02 del GOW 2.1	213
Figura 5.15 Distribución de los casos seleccionados correspondientes a los datos del punto 5 de oleaje y punto 2 de viento de los utilizados en la selección con MaxDiss ...	217
Figura 5.16 Casos seleccionados con el algoritmo MaxDiss en la malla GM02	218
Figura 5.17 Esquema del proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en indefinidas	220
Figura 5.18 Propagación del Caso 1 de la selección MaxDiss de la malla GM02 del Golfo de Cádiz. Resultados de la altura de ola significativa (m) y dirección media del oleaje	224
Figura 5.19 Propagación del Caso 2 de la selección MaxDiss de la malla GM02 del Golfo de Cádiz. Resultados de la altura de ola significativa (m) y dirección media del oleaje	225
Figura 5.20 Interpolación RBF definida como una combinación de funciones radiales. Ejemplo en dos dimensiones (x_1, x_2) . La superficie superior es la función $RBF(x_1, x_2)$	226

Figura 5.21 Validación de las series temporales de los parámetros H_s , T_p y θ_m en la posición de la boya de Cádiz correspondientes al año 2007 y gráficos de dispersión y cuantiles de H_s , T_p y θ_m	232
Figura 5.22 Validación de las series temporales de los parámetros H_s y T_p en la posición de la boya de Cabo de Gata correspondientes al año 1998. Serie GOW reconstruida (rojo) y registro boya (azul)	232
Figura 5.23 Validación de las series temporales de los parámetros H_s y T_p en la posición de la boya de Cap de Pera correspondientes al año 2003. Serie GOW reconstruida (rojo) y registro boya (azul)	233
Figura 5.24 Localización de los puntos de estudio (naranja=puntos en reducidas y verdes=puntos alejados de la costa) y las mallas de propagación	234
Figura 5.25 Localización de 3 puntos de la zona de estudio sobre los que se va a hacer un primer análisis descriptivo (negro=puntos en reducidas, rojo=puntos alejados de costa).....	236
Figura 5.26 Series temporales de altura de ola significativa en profundidades indefinidas en los puntos de Cádiz, Carboneras y Delta del Ebro	237
Figura 5.27 Población de datos de H_s (puntos grises), umbral (línea discontinua) y excedencias independientes (cruces negras) en las aguas alejadas de la costa (I) y aguas someras (R) y de tres puntos de la zona de estudio	238
Figura 5.28 Variación espacial del parámetro de forma en profundidades indefinidas y reducidas. Sólo están representados los valores significativos al 95 %	240
Figura 5.29 Evolución anual del parámetro de localización (línea discontinua gris), parámetros de localización+escala (línea negra), umbral (línea negra discontinua) y excedencias sobre el umbral (cruces negras) en las aguas alejadas de la costa (I) y someras (R) de tres puntos de la zona de estudio	242
Figura 5.30 Tasa de eventos empírica (histograma) y del modelo (línea negra) en las aguas alejadas de la costa (I) y someras (R) de tres puntos de la zona de estudio (se representa la totalidad de los eventos)	244
Figura 5.31 Variación espacial de los cuantiles (m) asociados a 20, 50 y 100 años de período de retorno.....	245
Figura 5.32 Diagnóstico gráfico del ajuste del modelo Pareto-Poisson en el punto de Carboneras en aguas indefinidas.....	247

Figura 5.33 Diagnóstico gráfico del ajuste del modelo Pareto-Poisson en el punto de Carboneras en aguas reducidas	248
Figura 5.34 Variación espacial de la tendencia de largo plazo (cm/año) en el período 1989-2008. La escala de colores está acotada a ± 5 cm/año	249
Figura 5.35 Evolución del parámetro de localización (línea negra), la población de extremos utilizada (cruces negras), el umbral (línea discontinua gris) y el cuantil de 20 años de período de retorno (línea roja) en las profundidades indefinidas (I) y profundidades reducidas (R) del punto de Cádiz	250

Capítulo 6

Figura 6.1 Localización de los puntos de estudio	256
Figura 6.2 Primeros 6 EOF correspondientes a las presiones medias 3-diaras en el área geográfica del Atlántico Norte (anomalías de presión, mb)	259
Figura 6.3 Evolución temporal de los 6 primeros modos temporales estandarizados de las presiones medias 3-diaras en el área geográfica del Atlántico Norte	260
Figura 6.4 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diaras (mb) del Atlántico Norte ...	261
Figura 6.5 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte	262
Figura 6.6 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte	263
Figura 6.7 Situaciones sinópticas (mb) correspondientes a las celdas 10 y 100 de la SOM de tipos de tiempo	264
Figura 6.8 Situaciones sinópticas (mb) correspondientes a las celdas 54 y 63 de la SOM de tipos de tiempo	264
Figura 6.9 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte	265
Figura 6.10 Metodología de predicción del régimen extremal de oleaje a corto plazo .	266
Figura 6.11 Ventana de tiempo de 14 días de la serie temporal de oleaje, con los máximos 3-diaros y el campos de presiones medio 3-diaro (958 –1068 mb)	267
Figura 6.12 Histograma de alturas de ola significativa máxima 3-diaras de la celda 1 de la SOM de oleaje del Punto Norte	268
Figura 6.13 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaras para cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola	

entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Punto Norte (NA).....	269
Figura 6.14 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaria cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Coruña (CO).....	270
Figura 6.15 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaria para cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Cádiz (CA) .	271
Figura 6.16 SOM de los parámetros de la GEV para el Punto Norte (NA).....	273
Figura 6.17 SOM de los parámetros de la GEV para Coruña (CO).....	273
Figura 6.18 SOM de los parámetros de la GEV para Cádiz (CA).....	273
Figura 6.19 Regímenes extremales de oleaje para cada tipo de tiempo. Punto Norte...	274
Figura 6.20 Tipo de tiempo correspondiente a la celda 100 y régimen extremal de oleaje que genera. Punto Norte (NA).....	275
Figura 6.21 Tipo de tiempo correspondiente a la celda 1 y régimen extremal de oleaje que genera.	
Punto	Norte
(NA).....	276
Figura 6.22 Regímenes extremales de oleaje para cada tipo de tiempo. Coruña	277
Figura 6.23 Regímenes extremales de oleaje para cada tipo de tiempo. Cádiz.....	278
Figura 6.24 Metodología de predicción del régimen extremal de oleaje a largo plazo .	280
Figura 6.25 Excedencias de altura de ola (cruces negras) sobre el umbral (línea punteada) y máximos de oleaje 3-diarios para cada uno de los puntos de estudio	282
Figura 6.26 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diarias (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en el Punto Norte	284
Figura 6.27 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte	284
Figura 6.28 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte	285
Figura 6.29 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte	286
Figura 6.30 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte.....	287
Figura 6.31 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diarias (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en Coruña.....	288

Figura 6.32 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña.....	289
Figura 6.33 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña.....	289
Figura 6.34 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña.....	290
Figura 6.35 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña.....	291
Figura 6.36 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diarias (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en Cádiz.....	292
Figura 6.37 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz.....	293
Figura 6.38 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz.....	293
Figura 6.39 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña.....	294
Figura 6.40 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz.....	295
Figura 6.41 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje del Punto Norte.....	297
Figura 6.42 Histogramas y funciones de densidad (línea roja) de Pareto para cada población de excedencias de la SOM del Punto Norte.....	297
Figura 6.43 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje de Coruña.....	298
Figura 6.44 Histogramas y funciones de densidad de Pareto para cada población de excedencias de la SOM de Coruña.....	298
Figura 6.45 Diagnóstico gráfico mediante <i>QQ plot</i> de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias en la SOM de Coruña.....	299
Figura 6.46 Diagnóstico gráfico mediante <i>PP plot</i> de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias en la SOM de Coruña.....	299
Figura 6.47 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje de Cádiz.....	300
Figura 6.48 Histogramas y funciones de densidad de Pareto para cada población de excedencias de la SOM de Cádiz.....	301
Figura 6.49 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Punto Norte.....	302

Figura 6.50 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Coruña.....	303
Figura 6.51 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Cádiz.....	304
Figura 6.52 Metodología de predicción del régimen extremal de oleaje a muy largo plazo.....	305
Figura 6.53 Histograma y función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral en aquellas celdas en las que se ha hecho el ajuste. Punto Norte.....	308
Figura 6.54 Histograma y función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral en aquellas celdas en las que se ha hecho el ajuste. Coruña.....	309
Figura 6.55 Diagnóstico gráfico mediante QQ <i>plot</i> de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias. Coruña.....	310
Figura 6.56 Diagnóstico gráfico mediante PP <i>plot</i> de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias. Coruña.....	310
Figura 6.57 Histograma y función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral en aquellas celdas en las que se ha hecho el ajuste. Cádiz.....	311
Figura 6.58 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Punto Norte.....	313
Figura 6.59 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Coruña.....	314
Figura 6.60 Regímenes extremales estacionales de oleaje. Coruña.....	315
Figura 6.61 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Cádiz.....	316
Figura 6.62 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos históricos de NCEP (1960-1990, anomalías de presión, mb).....	319
Figura 6.63 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo ECHAM 5 (1960-1990, anomalías de presión, mb).....	320
Figura 6.64 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo CNRM CM3 (1960-1990, anomalías de presión, mb).....	321

Figura 6.65 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo UK-HadCM3 (1960-1990, anomalías de presión, mb).....	322
Figura 6.66 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990.....	323
Figura 6.67 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de DEF de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990.....	324
Figura 6.68 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de MAM de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990.....	325
Figura 6.69 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de JJA de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990.....	326
Figura 6.70 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de SON de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990.....	327
Figura 6.71 Régimen extremal de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del <i>ensemble</i> de los modelos climáticos globales (línea gris). Punto Norte.....	329
Figura 6.72 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Punto Norte.....	330
Figura 6.73 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Punto Norte.....	331
Figura 6.74 Régimen extremal de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del <i>ensemble</i> de los modelos climáticos globales (línea gris). Coruña.....	333
Figura 6.75 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Coruña.....	334

Figura 6.76 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Coruña.....335

Figura 6.77 Régimen extremal de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del *ensemble* de los modelos climáticos globales (línea gris). Cádiz..... 337

Figura 6.78 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Cádiz338

Figura 6.79 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Cádiz.....339

Figura 6.80 Población de extremos utilizada (cruces negras), umbral (línea discontinua gris) y cuantil de 50 años de período de retorno (línea roja) extrapolado al año 2040 en cada punto de estudio 342

Figura 6.81 Diferencias entre la H_{50} del período 2010-2040 y 1960-1990 para los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) y diferencias entre la H_{50} de 2040 y 1990 obtenidas mediante la extrapolación de tendencias (negro) 343

LISTA DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 2.1 Esquema de las bases de datos utilizadas y apartado en el que se describen.. 60

Capítulo 3

Tabla 3.1 Valores de los estimadores (m) y sus errores estándar del modelo GEV mensual en el punto NA106

Tabla 3.2 Valores de los estimadores (m) y sus errores estándar del modelo Pareto-Poisson en el punto NA110

Tabla 3.3 Valores de los estimadores (m) y sus errores estándar del modelo GEV mensual en Cádiz121

Tabla 3.4 Valores de los estimadores (m) y sus errores estándar del modelo GEV semanal en Cádiz.....125

Tabla 3.5 Clasificación de los modelos de extremos y recomendaciones de uso.....129

Capítulo 4

Tabla 4.1 Períodos de medida de las misiones satelitales134

Tabla 4.2 Períodos de medida de las misiones satelitales154

Tabla 4.3 Correlación entre las PCs y los índices NAO, EA, EA/WR y SCA	170
--	-----

Capítulo 6

Tabla 6.1 Tasas de ocurrencia mensuales del Punto Norte	287
Tabla 6.2 Tasas de ocurrencia mensuales de Coruña	291
Tabla 6.3 Tasas de ocurrencia mensuales de Cádiz	295
Tabla 6.4 Entropía relativa (RE) de las probabilidades de los campos de presiones obtenidos por los modelos climáticos respecto a los campos de presiones de NCEP en el período 1960-1990	323
Tabla 6.5 Entropía relativa (RE) de las probabilidades de los campos de presiones de DEF obtenidos por los modelos climáticos respecto a los campos de presiones de NCEP de DEF en el período 1960-1990	325
Tabla 6.6 Entropía relativa (RE) de las probabilidades de los campos de presiones de MAM obtenidos por los modelos climáticos respecto a los campos de presiones de NCEP de MAM en el período 1960-1990	326
Tabla 6.7 Entropía relativa (RE) de las probabilidades de los campos de presiones de JJA obtenidos por los modelos climáticos respecto a los campos de presiones de NCEP de JJA en el período 1960-1990	327
Tabla 6.8 Entropía relativa (RE) de las probabilidades de los campos de presiones de SON obtenidos por los modelos climáticos respecto a los campos de presiones de NCEP de SON en el período 1960-1990	327
Tabla 6.9 Valores de la tendencia media de largo plazo	341

LISTA DE SÍMBOLOS

c_i	Celdas o centroides de la SOM
D	Duración de la excedencia o persistencia
d	Distancia entre grupos
$d_{i,j}$	Disimilitud entre el dato i y los j elementos del subconjunto R
$d_{i,\text{subconjunto}}$	Disimilitud entre el dato i y el subconjunto R
$F_i(y)$	Función de distribución de altura de ola significativa en cada celda i de la SOM
$F_{\text{total}}(y)$	Función de distribución de altura de ola significativa en un punto
H_{m0}	Altura de ola del momento de orden cero espectral
H_s	Altura de ola significativa
$H_{s,c}$	Altura de ola significativa calibrada
$H_{s,GOW}$	Altura de ola significativa del reanálisis GOW
$H_{s_{\text{max}}}$	Altura de ola significativa máxima
$H_{s,\text{sat}}$	Altura de ola significativa de satélite
$H_{s_{20}}, H_{s_{50}}, H_{s_{100}}$	Altura de ola asociada al período de retorno 20, 50 ó 100 años
$H_{97\%}$	Percentil 97 de la altura de ola significativa
k	Coefficiente de corrección en la calibración

$k(t)$	Factor de escala
$L(x; \theta)$	Función de verosimilitud
$l(x; \theta)$	Función logarítmica de verosimilitud
N_{\max}	Máximo número de datos por celda
n_p	Número máximo de parámetros
p_i	Probabilidad de presentación de los centroides de la SOM
\mathcal{Q}	Niveles de la superficie del mar
R	Período de retorno; subconjunto
r	Número de eventos; coeficiente de correlación
T_m	Período medio
T_s	Constante para escalar la unidad temporal de trabajo
T_p	Período de pico espectral
u	Umbral de corte
u_i	Umbral de corte en profundidades indefinidas
u_r	Umbral de corte en profundidades reducidas
$S(w)$	Espectro frecuencial
$S(w, \theta)$	Espectro direccional
$\text{var}_{\text{EOF}i}$	Varianza explicada por el EOF i
W	Estadístico resultante del cambio de variable del modelo estadístico GEV a la distribución Gumbel; velocidad del viento
W_x	Viento en la dirección x
W_y	Viento en la dirección y
Z	Tasa acumulada entre eventos extremales consecutivos
β_{LT}	Tendencia de largo plazo
$\Delta H_{s_{20}}, \Delta H_{s_{50}}, \Delta H_{s_{100}}$	Incremento de altura de ola significativa asociada al período de retorno 20, 50 ó 100 años
Δt	Valor mínimo de tiempo entre eventos independientes
η	Cota del nivel del mar
λ_i	Autovalores

μ	Parámetro de localización de la distribución GEV
θ_m	Dirección media del oleaje
θ_w	Dirección media del viento
$\theta_{m,GOW}$	Dirección media del oleaje del reanálisis GOW
ν	Tasa de ocurrencia de eventos anual
$\nu_{DEF}, \nu_{MAM}, \nu_{JJA}, \nu_{SON}$	Tasa de ocurrencia de eventos en las estaciones DEF, MAM, JJA, DEF
ν_1, \dots, ν_{12}	Tasa de ocurrencia de eventos en cada mes del año
ξ	Parámetro de forma de la distribución GEV
ψ	Parámetro de escala de la distribución GEV
$\ \cdot \ $	Norma euclidiana
-	Símbolo para denominar el valor medio de una variable
$\hat{\cdot}$	Símbolo para designar el estimador de un parámetro

LISTA DE ACRÓNIMOS

A1B	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia A1
A2	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia A2
B1	Escenario de cambio climático del IPCC de la familia B1
AGCM	Modelo general de circulación atmosférica
AIC	Criterio de información de Akaike
AMO	Oscilación multidecadal del Atlántico (<i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i>)
AR4	Cuarto informe de evaluación del IPCC (<i>Fourth Assessment Report</i>)
AO	Oscilación del Ártico (<i>Arctic Oscillation</i>)
BACO	BAtimetrías y cartas náuticas de la COsta
BMVE	Bajamar mínima viva equinoccial
BODC	<i>British Oceanographic Data Centre</i>
CA	Punto de estudio Cádiz
CCC	Compromiso de Composición Constante
C-ERA-40	<i>Corrected ERA-40</i>
CNRM CM3	Modelo global perteneciente al <i>Centre National de Recherche Météorologiques</i>
CO	Punto de estudio Coruña
CO ₂	Dióxido de carbono

C.P.	Cero del Puerto
CSIRO	<i>Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization</i>
DEF	Diciembre-Enero-Febrero
DMI	<i>Dipole Mode Index</i>
EA	Patrón del Este Atlántico (<i>East Atlantic pattern</i>)
EA/WR	Patrón del Este Atlántico-Oeste de Rusia (<i>East Atlantic-Western Russian pattern</i>)
ECHAM 5	Modelo global perteneciente al <i>Max Planck Institute für Meteorologie</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur (<i>El Niño-Southern Oscillation</i>)
EOFs	Función empírica ortogonal (<i>Empirical Orthogonal Function</i>)
EP/NP	Patrón del Pacífico Este-Pacífico Norte (<i>East Pacific-North Pacific pattern</i>)
ERA-40	Simulaciones numéricas de la circulación atmosférica global realizado por ECMWF para el período enero 1989-presente
ERA-INTERIM	Simulaciones numéricas de la circulación atmosférica global realizado por ECMWF para el período septiembre 1957-agosto 2002
ERS-2	Satélite europeo (<i>Europe Remote Sensing 2</i>)
GCM	Modelo general de circulación (<i>General Circulation Model</i>)
GEBCO	<i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GEI	Gases de efecto invernadero
GEV	Función generalizada de extremos (<i>Generalized extreme Value</i>)
GFO	Satélite estadounidense (<i>Geosat Follow-On</i>)
GOW	Reanálisis de oleaje global de IH Cantabria (<i>Global Ocean Waves</i>)
GPD	Función Generalizada de Pareto (<i>Generalized Pareto Distribution</i>)
GtC/año	Gigatoneladas de carbono al año
UK-HadCm3	Modelo global perteneciente al <i>Hadley Centre</i>
IE-EE	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC
IH Cantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
<i>iid</i>	Independiente e idénticamente distribuida
IOD	Dipolo del Océano Índico (<i>Indian Ocean Dipole</i>)

IPCC	Panel Intergubernamental de cambio Climático
IS92	Primeros escenarios de cambio climático que creó el IPCC y que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero
JJA	Junio-Julio-Agosto
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
JRA-25	Simulaciones numéricas de la circulación atmosférica global realizado por JMA para el período 1979-presente
MAM	Marzo-Abril-Mayo
MaxDiss	Método de selección por máxima disimilitud
MDA	Máximo Dominio de Atracción
MLE	Método de máxima verosimilitud (<i>Maximum Likelihood Estimation</i>)
MMA	Método de Máximo Anual
MMM	Método de Máximos Mensuales
MMS	Método de Máximos Semanales
MPIM	<i>Max Planck Institute für Meteorologie</i>
NA	Punto de estudio en el Atlántico Norte unos 500 km al oeste de Irlanda
NAO	Oscilación del Atlántico Norte (<i>North Atlantic Oscillation</i>)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP/NCAR	<i>National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research</i>
NMM	Nivel medio del mar
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NPI	<i>North Pacific Index</i>
OGCM	Modelo general de circulación oceánica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OPPE	Organismo Público Puertos del Estado
PCs	Componentes principales (<i>Principal Components</i>)
PDO	Oscilación multidecadal del Pacífico (<i>Pacific Multidecadal Oscillation</i>)
PMVE	Pleamar máxima viva equinoccial
PNA	Patrón de Norte América-Pacífico (<i>Pacific North American Index</i>)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

POT	<i>Peak Over Threshold</i>
PP	Probabilidad-probabilidad (<i>Probability-probability</i>)
QBO	Oscilación cuasi-bianual o “Vientos de Singapur” (<i>Quasi-biennial Oscillation</i>)
QQ	Cuantil-cuantil (<i>Quantile-quantile</i>)
RA	Altímetros de radar (<i>Radar altimeter</i>)
RBF	Método de interpolación de funciones de base radial (<i>Radial Basis Function</i>)
RE	Entropía relativa
REDCOS	Red de boyas en aguas costeras del OPPE
REDEXT	Red de boyas en aguas profundas del OPPE
REDMAR	Red de mareógrafos del OPPE
SAM	Oscilación del Antártico (<i>Southern Annular Mode</i>)
SCA	Patrón de Escandinavia (<i>Scandinavian pattern</i>)
SCE-UA	Algoritmo de optimización global (<i>Shuffled Complex Evolution</i>)
SLP	Presión a nivel del mar (<i>Sea level pressure</i>)
SOI	<i>Southern Oscillation Index</i>
SOM	Redes auto-organizativas (<i>Self-organizing maps</i>)
SON	Septiembre-Octubre-Noviembre
SST	Temperatura superficial del agua (<i>Sea Surface Temperature</i>)
SWAN	Modelo numérico de propagación de oleaje (<i>Simulating WAVes Nearshore</i>)
TOMAWAC	Modelo numérico de propagación de oleaje (<i>TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation</i>)
TOPEX/Poseidon	Satélite franco-estadounidense de oceanografía espacial (1997-2003)
TVE	Teoría de Valores Extremos
WAM	Modelo numérico de generación de oleaje (<i>WAVE Model</i>)
WASA	Reanálisis de oleaje (<i>Waves and Storms in the North Atlantic</i>)
WEMO	<i>Western Mediterranean Oscillation</i>
WP	Índice del Pacífico Oeste (<i>Western Pacific index</i>)
WW III	Modelo numérico de generación de oleaje (<i>Wave Watch III</i>)

XIOM	Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics
20C3M	Escenario hipotético utilizado como muestra científica para el diagnóstico de las proyecciones de los modelos globales

