

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

CAPITULO 6

RÉGIMEN EXTREMAL EN FUNCIÓN DE PATRONES DE TIEMPO

6.1 Introducción

Como se dijo en capítulos anteriores, las actividades que el hombre realiza en el mar y la costa requieren el estudio del clima marítimo en distintas escalas temporales. Por ejemplo, en lo que se refiere a la pesca o al uso del mar como vía de comunicación, el corto plazo será importante a la hora de decidir si las condiciones del mar permiten la salida del barco. En cuanto al diseño de las rutas marítimas, el largo plazo es la escala de tiempo necesaria, a nivel anual y estacional, para poder marcar las rutas más adecuadas

o cancelación de la línea en una determinada estación (por ejemplo líneas de cruceros). Otro ejemplo son las estructuras marítimas. La vida de una estructura tiene distintas fases y en cada una de ellas será más apropiado conocer el clima marítimo a distintas escalas temporales. En la fase de diseño será necesaria la caracterización del clima marítimo de la zona en el largo plazo, en concreto el clima marítimo extremal en términos de fiabilidad. Sin embargo, en la fase de construcción la información a corto plazo y medio plazo será clave para la organización de los planes de obra. Igualmente ocurre durante la fase de explotación, en la que el conocimiento del clima marítimo extremal a corto y medio plazo será muy útil para gestionar y planificar las actividades comerciales del puerto. Las escalas temporales descritas para ambos ejemplos son extensibles a otras actividades e intereses socioeconómicos y ambientales que el hombre tiene en el océano y la costa. Además de las escalas de tiempo comentadas, las circunstancias actuales de calentamiento global han hecho que también interese incorporar la variación de los agentes climáticos por efecto del cambio climático en lo que será la escala del muy largo plazo.

Por tanto, se pueden distinguir cuatro escalas temporales en la caracterización del clima marítimo extremal:

- Corto plazo: predicción del oleaje con un alcance de 24-100 horas
- Medio plazo: predicción del oleaje para períodos inferiores a los 6 meses
- Largo plazo: registros históricos con la mayor longitud temporal posible
- Muy largo plazo: la proyección del clima marítimo extremal en diferentes escenarios de cambio climático

El interés por trabajar a distintas escalas temporales ha dado lugar al planteamiento de distintas metodologías de *downscaling* estadístico que permitan inferir el régimen extremal. En este capítulo nos hemos centrado en el corto, largo y muy largo plazo.

En lo que se refiere a la escala temporal de días (corto plazo) se presenta una metodología que, combinando la climatología sinóptica de la zona de influencia del punto de estudio y un modelo de extremos GEV, permite inferir en el régimen extremal de oleaje causado por una situación atmosférica media a 3 días vista.

La escala de largo plazo y su variabilidad estacional se aborda mediante una metodología que combina los patrones de tiempo con un modelo de extremos basado en el método POT, para el punto de estudio. Esta nueva metodología presenta dos posibles líneas de acción, una centrada en los patrones de tiempo que causan los extremos de oleaje en el punto de estudio y otra en la que se trabaja con todos los tipos de tiempo de la zona de influencia del punto. Ambos planteamientos permiten obtener el régimen extremal estacional en un punto.

Por último, la escala del largo plazo está tomando un interés creciente en los últimos años debido al cambio climático. El estudio del largo plazo del clima marítimo extremal puede abordarse por dos vías: el análisis de las tendencias de los extremos de oleaje a partir de datos históricos y la proyección del régimen extremal de oleaje a distintos escenarios de cambio climático. En este capítulo se va a abordar el análisis del clima marítimo extremal en un punto a largo plazo mediante las proyecciones para los distintos escenarios del IPCC. Para ello se plantea la metodología basada en los patrones de tiempo del área objeto de estudio y el modelo estadístico basado en el método POT, el cual también sirve para estudiar el régimen extremal estacional.

Las metodologías presentadas para el estudio del régimen extremal de oleaje a distintas escalas temporales se han aplicado en tres puntos de la cuenca Atlántica. En cuanto al estudio del largo plazo se ha proyectado el régimen extremal a los escenarios A1B, A2 y B1 utilizando los datos de tres modelos climáticos globales (GCM).

6.2 Puntos de estudio

Se han elegido tres puntos del Atlántico Norte para ilustrar la metodología presentada a continuación. Los puntos de estudio se muestran en la Figura 6.1 en la que se denominan NA (punto norte), correspondiente a un punto situado en la parte oriental del Atlántico Norte, en las coordenadas 15°W, 55°N, a unos 500 km al oeste de Irlanda, CO (Coruña), correspondiente a un punto frente a la costa gallega y CA (Cádiz), correspondiente a un punto frente a la costa de Cádiz.

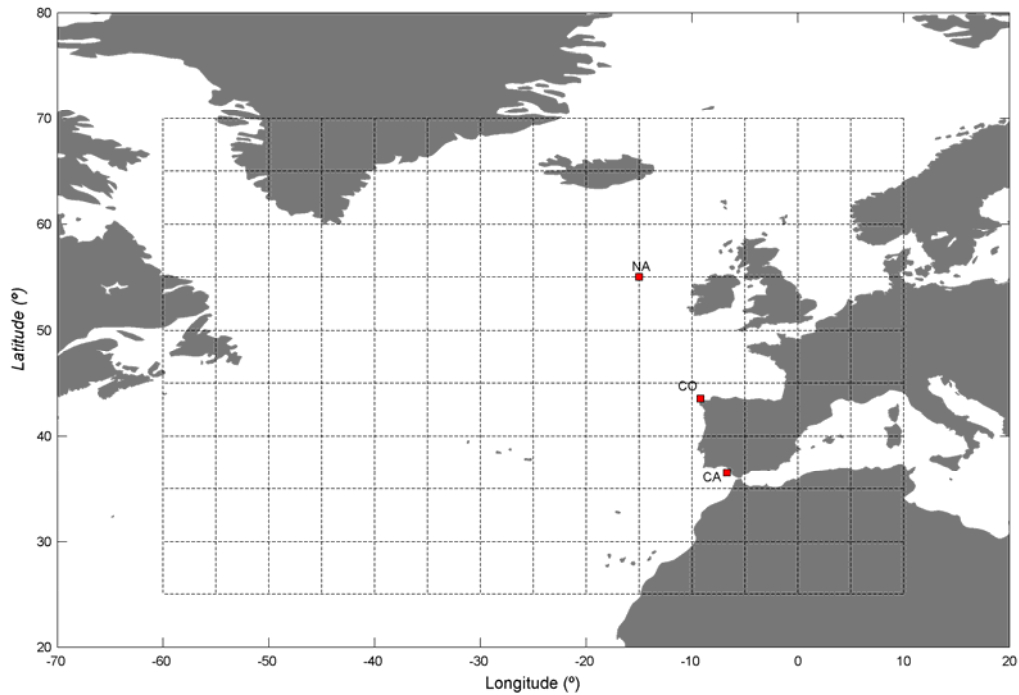


Figura 6.1 Localización de los puntos de estudio

Estos tres puntos se han elegido por la diversidad del clima marítimo de cada uno. El caso del Punto Norte se caracteriza por un clima marítimo severo fuertemente influenciado por la NAO. Coruña presenta un clima marítimo multimodal con dos familias de oleaje principales de direcciones oeste-noroeste y sur-suroeste. Por último, Cádiz tiene un clima marítimo más suave con oleajes de largo período procedentes del oeste y oleajes de viento generados por el levante.

La base de datos utilizada para los tres puntos ha sido el reanálisis GOW 1.0 (IH Cantabria). En este caso se ha optado por elegir una base de datos de reanálisis que permita tener un registro de datos largo, en el que esté incluido el período 1960-1990, considerado en muchos estudios climáticos como el período de control del siglo XX.

Como es sabido, el clima marítimo en un punto depende de las condiciones atmosféricas, se caracteriza por campos de viento a 10 m de altura o campos de presiones en superficie, en un área a su alrededor. En el caso de los tres puntos de estudio, el clima marítimo en cada uno de ellos está afectado por la situación atmosférica de la cuenca noratlántica. La metodología desarrollada para la obtención del clima marítimo extremal a distintas escalas temporales relaciona los tipos de tiempo del área de estudio con el régimen extremal de cada punto.

En la Figura 6.1 se muestra, mediante una rejilla, el área considerada en la afección al clima marítimo de los tres puntos. Para el análisis de la climatología sinóptica de la zona se han utilizado campos de presión a nivel del mar procedentes de la base de datos de reanálisis atmosférico NCEP/NCAR. En el área elegida se han extraído los campos de presiones 6-horarios en el período 1948-2008, coincidente con el período del reanálisis de oleaje.

6.3 Climatología sinóptica

El clima marítimo en un punto depende de las variaciones en la situación atmosférica de una zona de acción más amplia. A lo largo de esta tesis ya se ha vinculado la variabilidad interanual del oleaje con las anomalías de los campos de presiones. En este capítulo se establece una relación entre los tipos de tiempo de la zona de afección y el clima marítimo extremal del punto de estudio. Para ello se hace uso de la climatología sinóptica.

A principios de los años 70, con la publicación del libro *Synoptic climatology: methods and applications* (Barry y Perry, 1973), la climatología sinóptica quedó establecida como un campo de la climatología propiamente dicha. Después de esto se han desarrollado numerosas técnicas con el objetivo de relacionar la circulación atmosférica a escala sinóptica con respuestas climáticas o ambientales locales (analizando variables como temperatura o campos de presión).

Uno de los objetivos de este capítulo es establecer unos tipos de tiempo (campos espaciales de presión atmosférica en superficie) que se relacionen unívocamente con el oleaje extremo en un punto. Por lo tanto, proporcionado el tipo de tiempo, el objetivo es poder inferir el régimen extremal de oleaje generado por esa situación sinóptica. Para determinar los tipos de tiempo que afectan al clima marítimo extremal en una zona hay que tener en cuenta ciertas consideraciones en cuanto a la escala espacial y temporal con la que se va a trabajar. La definición de estas dos escalas vendrá determinada por la localización del punto de estudio y variabilidad de su clima marítimo.

6.3.1 Escala espacial

El oleaje en un determinado punto de estudio está vinculado a la evolución de las condiciones atmosféricas en una amplia zona, la cual dependerá del tamaño y características de la cuenca en la que se sitúe el punto de estudio y de la zona de generación del oleaje. Por ejemplo, los oleajes predominantes en la costa Cantábrica se generan al sur de Groenlandia bajo la influencia de borrascas noratlánticas, mientras que los oleajes más extremos localizados en las costas de Menorca se generan bajo el efecto de borrascas más locales sobre el Mar Mediterráneo occidental.

Teniendo en cuenta la situación del punto de estudio y las características de los mares que recibe habrá que determinar el área de influencia que permitirá generar los tipos de tiempo. Para el estudio de los extremos de oleaje en los puntos elegidos de la cuenca atlántica se propone el área delimitada en la Figura 6.1, que coincide con el área de influencia de la NAO. Sin embargo, si se quisiera estudiar un punto en la costa Mediterránea española, situado en una cuenca semicerrada, y con una variabilidad mucho mayor debido a la generación de tormentas locales, el área de estudio podría limitarse al Mediterráneo occidental y además sería deseable disponer de un *downscaling* dinámico atmosférico que mejore la resolución de los patrones sinópticos..

6.3.2 Escala temporal

Hay que tener en cuenta que el oleaje está vinculado a la generación y propagación de una borrasca. Dependiendo de la zona de estudio la independencia entre temporales asociados a borrascas será diferente. Por ejemplo, en el Mar Mediterráneo la independencia entre temporales puede fijarse en un día (debido a las características locales y dimensiones del mar), en el Atlántico Norte se suele utilizar los 3 días y en el Pacífico podrían utilizarse hasta 5 u 8 días (Alves, 2006). En este caso, en base a la experiencia en el estudio de la zona, se consideran 3 días de independencia entre temporales en el Atlántico Norte (Luceño et al., 2006; Camus, 2009).

El primer paso es obtener los campos de presiones medios 3-diaros, que serán los datos de entrada (predictor) para el análisis estadístico de los tipos de tiempo y los máximos de oleaje 3-diaros, que serán la respuesta a la variación atmosférica (predictando).

6.3.3 Patrones de tiempo

Para determinar los patrones de tiempo se ha utilizado la técnica de redes auto-organizativas (Kohonen, 2001). El análisis mediante redes auto-organizativas proporciona, a partir de unos datos de entrada, una clasificación sinóptica con un número específico de estados SOM. Este análisis devuelve los estados SOM localizados en una rejilla de proyección que tiene características de vecindad, por lo que los estados similares se encontrarán próximos entre sí y los más extremos localizados en los bordes de la rejilla. La técnica SOM se utiliza aquí como una herramienta complementaria a otras técnicas lineales como el análisis por componentes principales, que reduce la dimensionalidad del problema y también proporciona situaciones sinópticas.

Para reducir la dimensionalidad del problema se aplica un análisis por componentes principales a los campos de presiones medias 3-díarios. En la Figura 6.2 se muestran, a modo de ejemplo, los seis primeros modos espaciales obtenidos para el área del Atlántico Norte y en la Figura 6.3 los correspondientes modos temporales (o amplitudes).

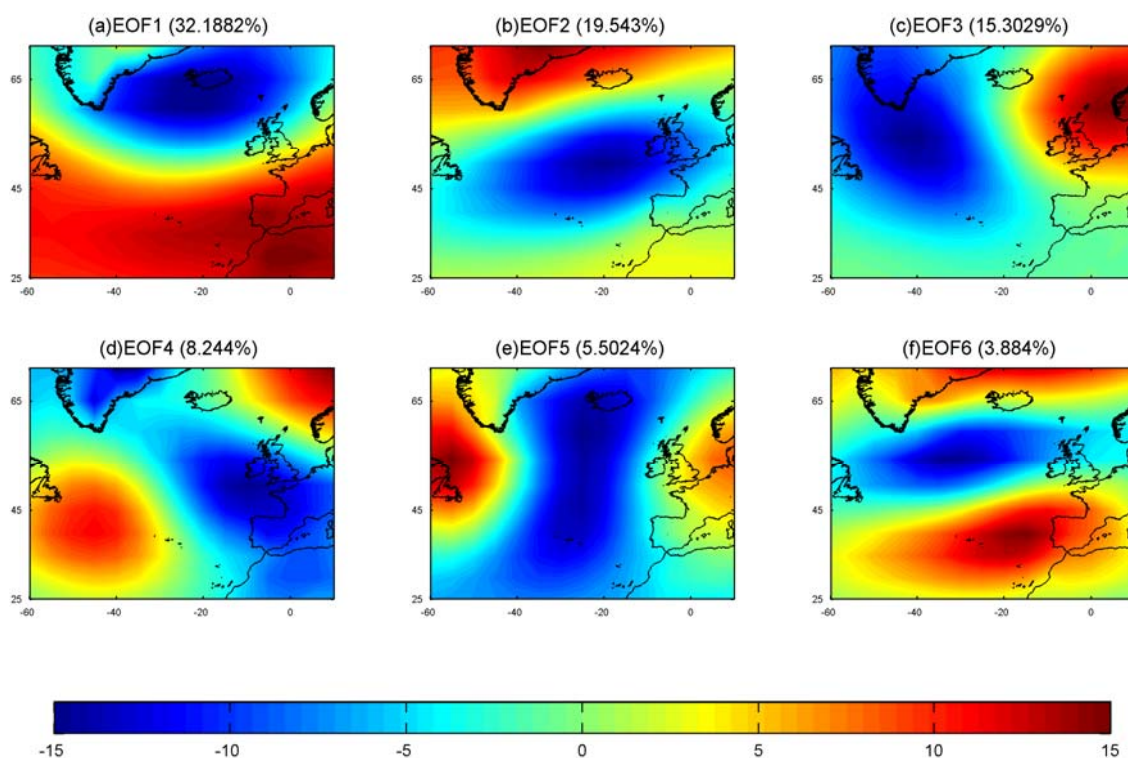


Figura 6.2 Primeros 6 EOF correspondientes a las presiones medias 3-díarias en el área geográfica del Atlántico Norte (anomalías de presión, mb)

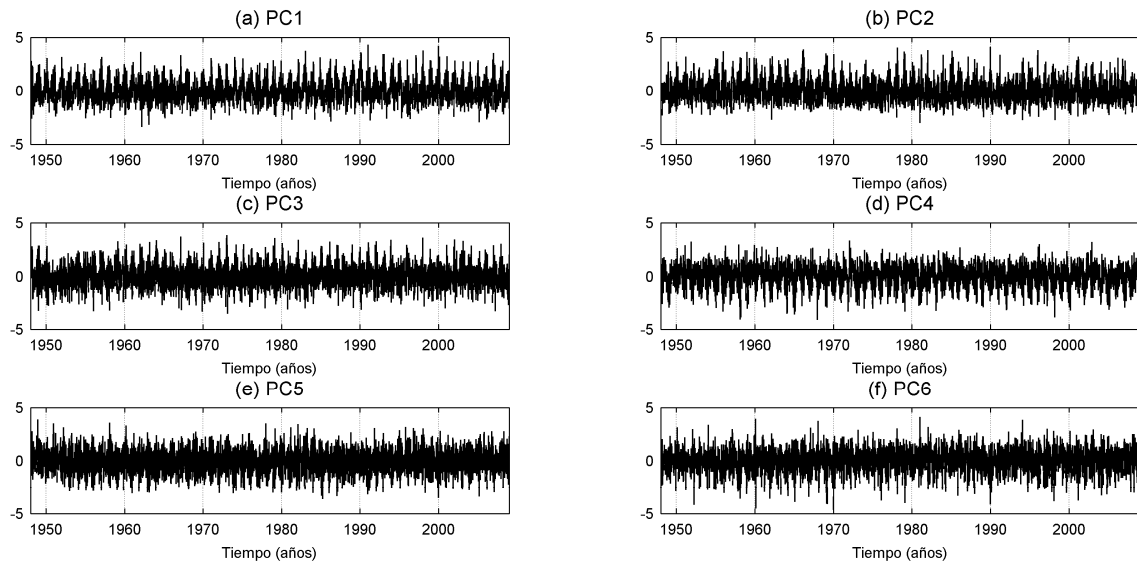


Figura 6.3 Evolución temporal de los 6 primeros modos temporales estandarizados de las presiones medias 3-diarias en el área geográfica del Atlántico Norte

Los modos espaciales obtenidos muestran situaciones sinópticas totalmente independientes entre sí. Para encontrar situaciones sinópticas de transición, a continuación se aplica la técnica de redes auto-organizativas. Con el objetivo de garantizar la suficiente variabilidad de los datos, en esta técnica se utilizan el número de componentes principales que expliquen al menos un 90 % de la varianza. La técnica SOM se ha llevado a cabo a partir de los 10 primeros modos del análisis por componentes principales (92.73 % de la varianza).

El tamaño de la SOM es el último parámetro a establecer. Dependiendo del número de datos disponibles, del tamaño de la cuenca elegida y su variabilidad, el tamaño de la SOM podrá ser mayor o menor, representado mayor o menor número de estados de tiempo. En el caso del Atlántico Norte se ha hecho un análisis de sensibilidad con tamaños de SOM de 8, 10 y 15 celdas por lado. El tamaño de 8 no fue capaz de reproducir adecuadamente la variabilidad en los tipos de tiempo del Atlántico, mientras que el tamaño de 15 celdas por lado no aportaba un valor añadido frente al tamaño 10×10 . En base a esto se ha elegido el tamaño 10×10 de SOM para obtener los tipos del tiempo del Atlántico Norte, los cuales se muestran en la Figura 6.4.

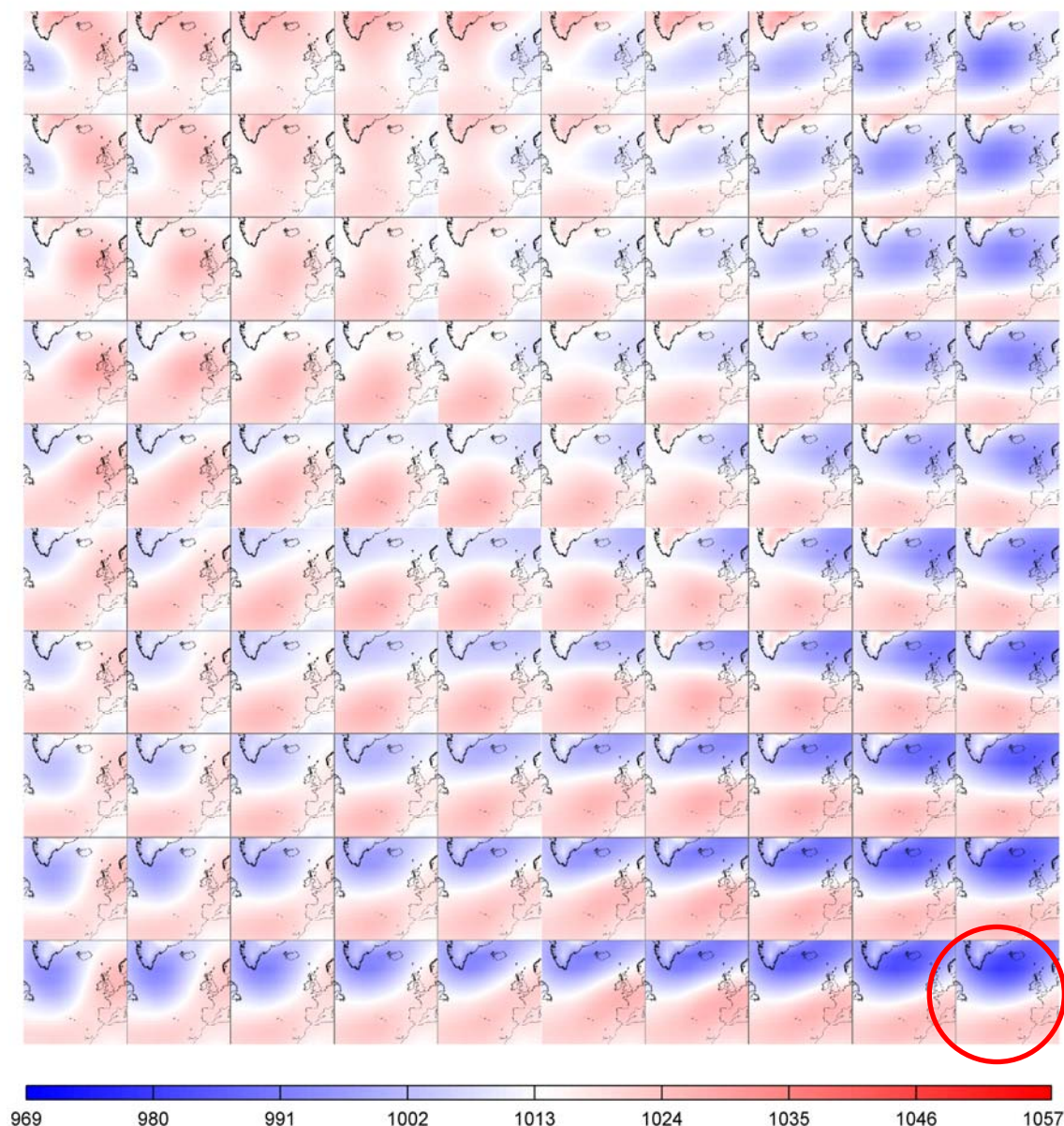


Figura 6.4 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diaras (mb) del Atlántico Norte

La situación sinóptica representativa de la NAO, con centro de bajas presiones al sur de Islandia y anticiclón en las Azores, se muestra en la Figura 6.4 rodeada con un círculo rojo, situada en el extremo inferior derecho de la rejilla. Se puede ver también que los vecinos más próximos muestran situaciones similares de transición.

La técnica SOM proporciona, además, la frecuencia de presentación de cada celda o centroide, información que será necesaria para proyectar el oleaje extremo sobre la rejilla de la SOM. Esto es, identificar a que casilla de la SOM corresponde cada estado de mar (mediante la frecuencia de presentación) y “volcarlo” sobre esa celda construyendo así la SOM de oleaje correspondiente a la SOM de tipos de tiempo.

En la Figura 6.5 se muestra el gráfico de probabilidades de la SOM para todo el período de tiempo 1948-2008, lo cual representa la probabilidad media de presentación.

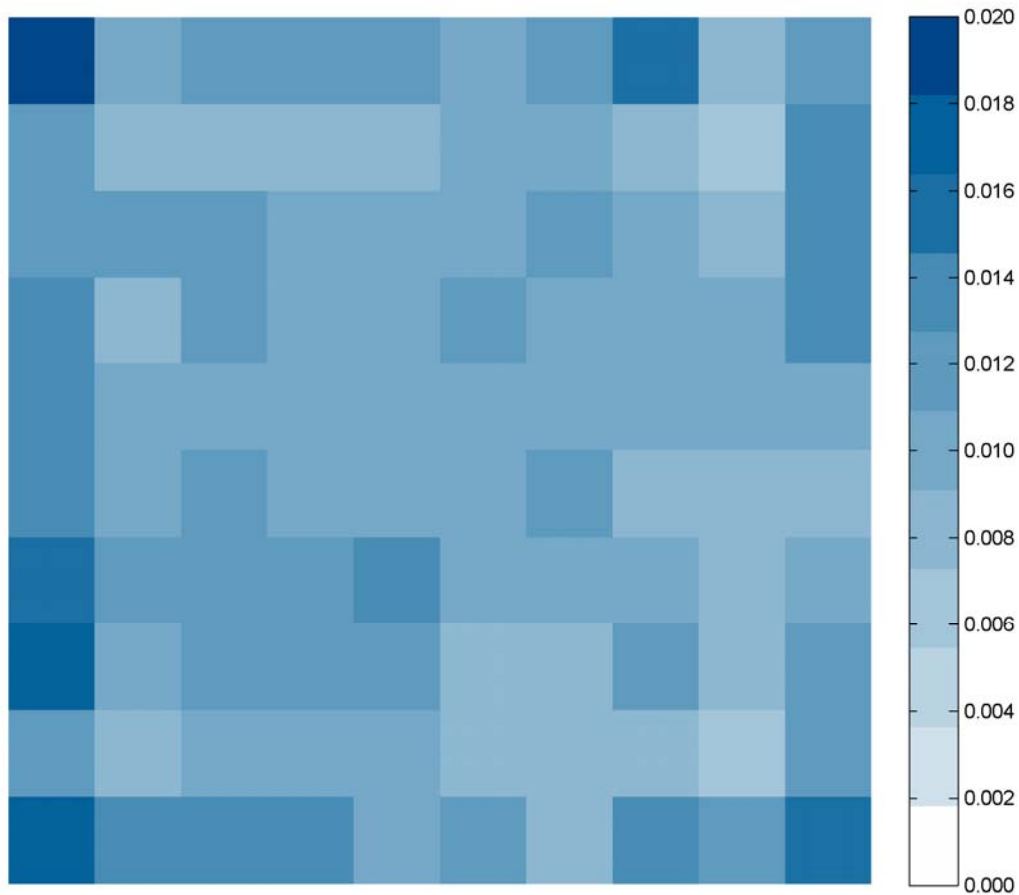


Figura 6.5 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

Así, para cada una de las celdas o centroides, c_i , de la SOM se obtiene una probabilidad de presentación p_i , tal que $\sum_{i=1}^N p_i = 1$, donde N es el tamaño de la SOM ($N = 100$ en el caso objeto de estudio).

Haciendo uso de la información temporal de los datos clasificados y de la frecuencia de presentación de cada centroide, se pueden construir los gráficos de probabilidades correspondientes a cada estación del año (Figura 6.6).

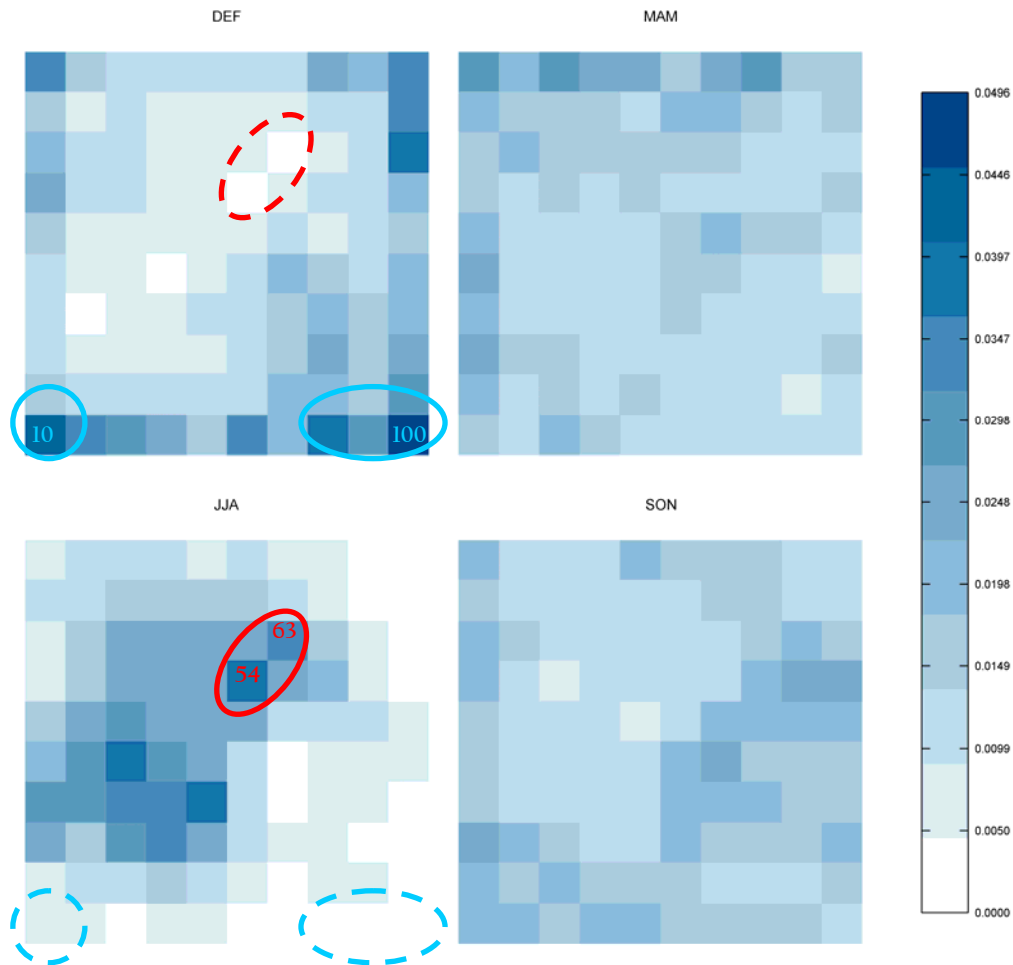


Figura 6.6 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

La Figura 6.6 proporciona información respecto a los tipos de tiempo con más probabilidad de ocurrencia en cada estación. Se puede ver que en los meses de invierno (DEF) es más probable encontrar situaciones sinópticas similares a la NAO (rodeadas en azul), que dan lugar a temporales del noroeste. Por ejemplo, en la Figura 6.7 se muestra un zoom las situaciones de las celdas 10 y 100, muy probables en invierno. Ambas situaciones presentan una borrasca en el noroeste que genera oleaje en el Atlántico Norte, sin embargo, la posición e intensidad del centro de bajas presiones determinará la intensidad y dirección del oleaje. En el caso de la celda 10, la situación atmosférica con borrasca bajo Groenlandia genera un oleaje con dirección predominante del nor-noroeste, mientras que la situación de la borrasca al suroeste de Islandia genera un oleaje en la cuenca con dirección predominantemente del noroeste.

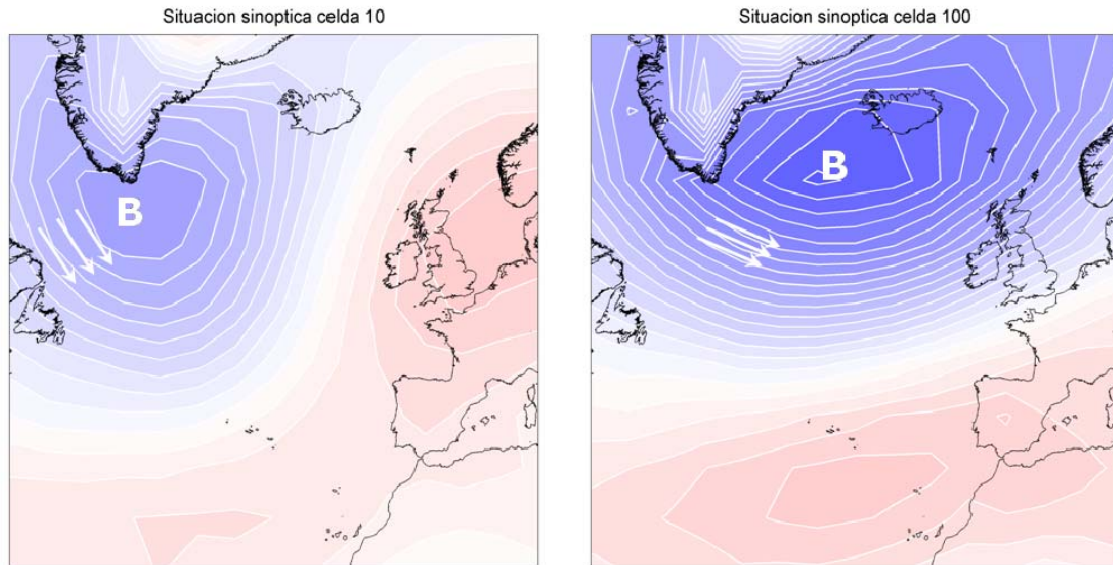


Figura 6.7 Situaciones sinópticas (mb) correspondientes a las celdas 10 y 100 de la SOM de tipos de tiempo

Sin embargo, hay situaciones, correspondientes a altas presiones sobre la Península Ibérica e Islas Británicas cuya probabilidad de ocurrencia en invierno es nula (celdas rodeadas por la línea discontinua roja). Por el contrario, se puede ver que estas situaciones son de las más probables en los meses de verano (JJA). En la Figura 6.8 se muestra un zoom de las situaciones sinópticas de las celdas 54 y 63, muy probables en verano y nada en invierno.

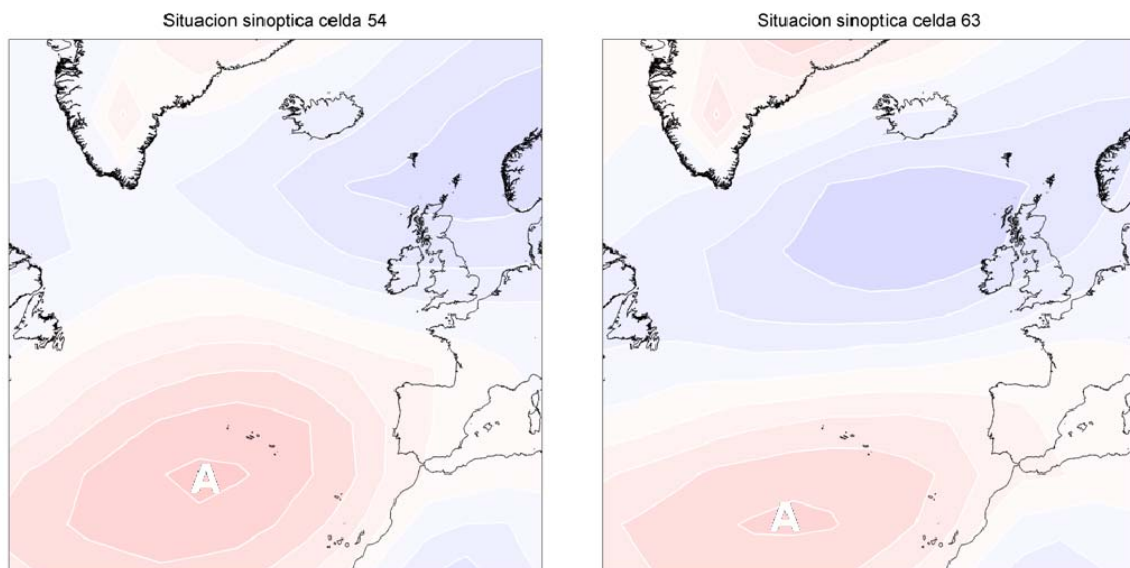


Figura 6.8 Situaciones sinópticas (mb) correspondientes a las celdas 54 y 63 de la SOM de tipos de tiempo

En estas dos situaciones se puede ver un anticiclón situado en las proximidades de las Azores. En la situación de la celda 54 hay una borrasca de muy baja intensidad situada sobre el norte de Europa que generará vientos del norte. En la situación de la celda 63 el centro de la borrasca está desplazado hacia el oeste de las Islas Británicas, lo que podrá generar un oleaje suave que podrá llegar al Mar Cantábrico con poco período (mares típicos de verano de esta zona).

Igualmente se pueden construir los gráficos de probabilidad de ocurrencia para cada mes (Figura 6.9).

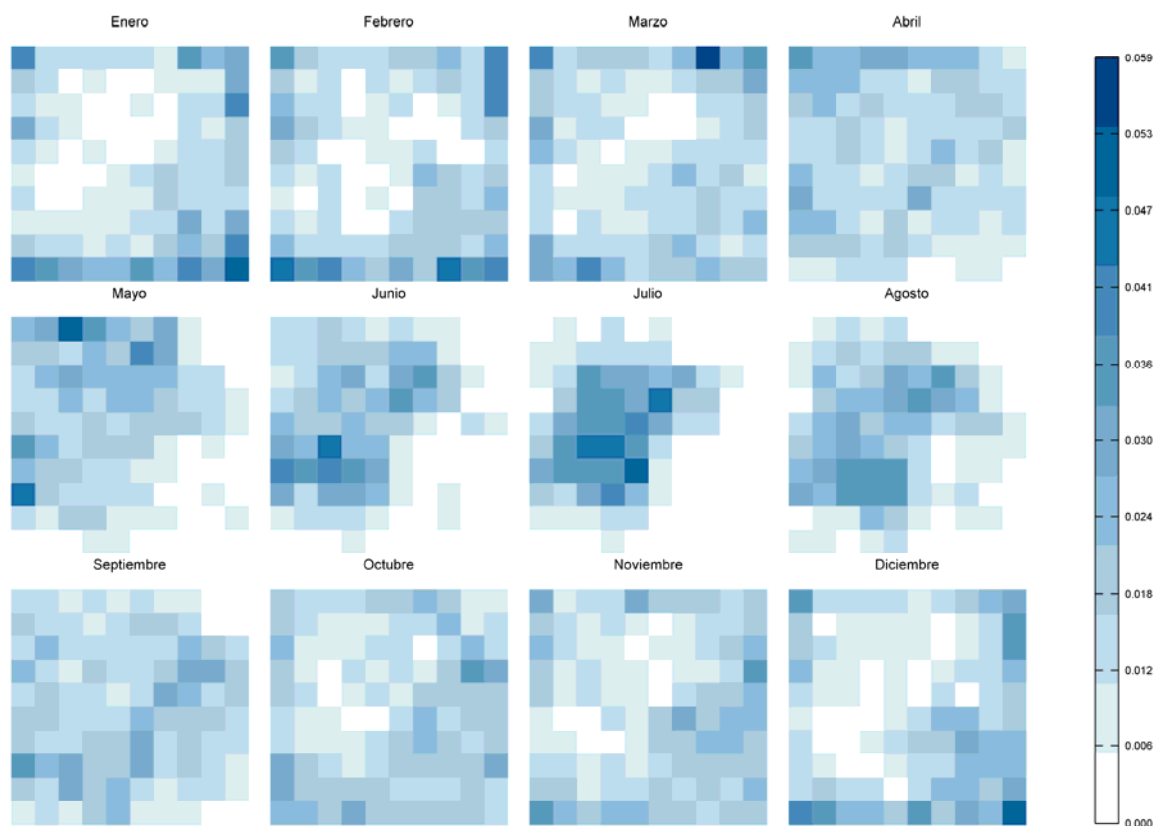


Figura 6.9 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

En este caso se ve que hay muchas situaciones sinópticas cuya probabilidad de ocurrencia en ciertos meses es nula. Por ejemplo, en los meses de Enero, Febrero o Marzo, las situaciones atmosféricas con predominancia de altas presiones desaparecen, mientras que en los meses de Junio, Julio y Agosto, los tipos de tiempo que generan borrascas noratlánticas tienen probabilidad de ocurrencia nula.

6.4 Predicción a corto plazo: Régimen extremal de oleaje basado en un modelo GEV

A continuación se presenta una herramienta que permite inferir el régimen extremal de oleaje de un punto de estudio a corto plazo. Conocida la situación atmosférica de los próximos 3 días (predicción del campo de presiones en superficie) se proporciona el régimen extremal de oleaje al que da lugar. Para ello se ha utilizado un modelo basado en la función GEV. La metodología se resume en esquema de la Figura 6.10:

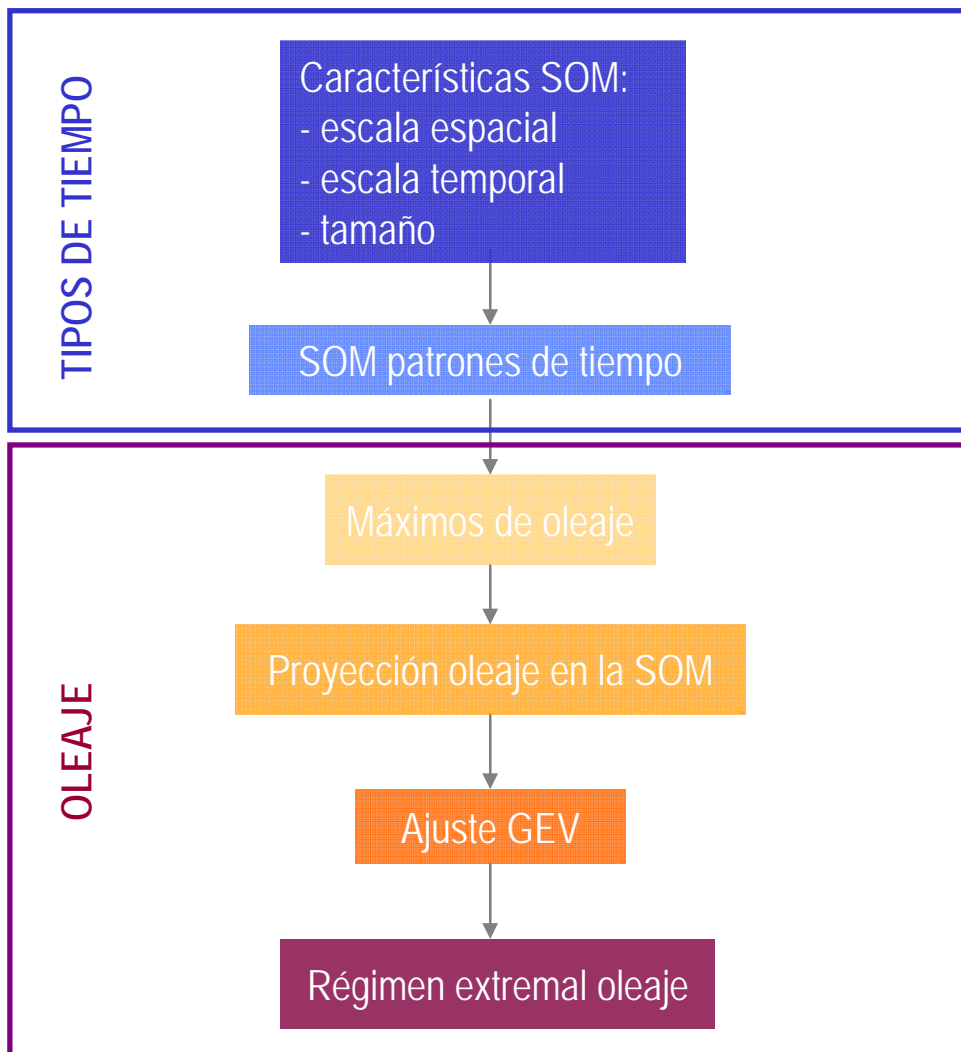


Figura 6.10 Metodología de predicción del régimen extremal de oleaje a corto plazo

La metodología presentada en el esquema comprende los siguientes pasos:

- Determinación de la zona de influencia del punto de estudio (escala espacial), independencia entre temporales (escala temporal, en el caso del Atlántico Norte 3 días) y tamaño de la SOM.
- Obtención de la SOM de patrones de tiempo.
- Determinación de los máximos de oleaje 3-diaros asociados a los campos de presión medios 3-diaros.
- Proyección de los máximos 3-diaros de oleaje en la rejilla de la SOM.
- Ajuste de un modelo GEV en cada celda de la SOM.
- Obtención del régimen extremal para cada tipo de tiempo.

Una vez establecidos los tipos de tiempo en la zona de interés, el objetivo es vincular estos tipos de tiempo con los oleajes extremos que generaron. Para ello, en primer lugar hay que seleccionar los oleajes extremos, y a continuación volcarlos en la rejilla de proyección de la SOM.

La selección de extremos de oleaje está condicionada por los tipos de tiempo, los cuales corresponden a campos de presión medios 3-diaros. Para vincular unívocamente el tipo de tiempo con el oleaje extremo se han seleccionado los máximos en un bloque de tiempo correspondiente a 3 días. De esta manera cada predictor, $\overline{SLP}_{3diario,i}$, tiene asociada una altura de ola significativa máxima, $H_{s_{max},i}$ (ver Figura 6.11).

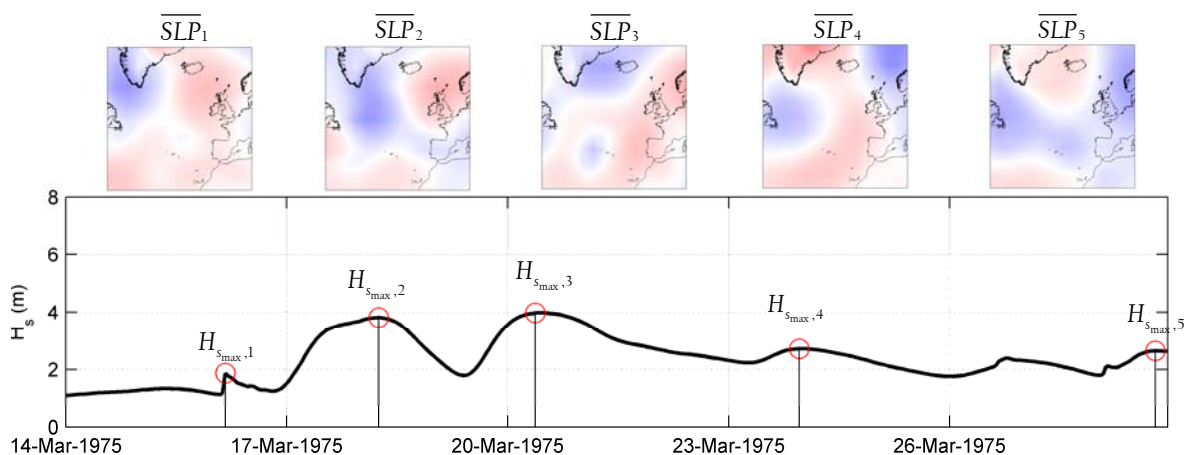


Figura 6.11 Ventana de tiempo de 14 días de la serie temporal de oleaje, con los máximos 3-diaros y los campos de presiones medio 3-diaros (958 – 1068 mb)

Haciendo uso de las probabilidades de ocurrencia de la SOM se han volcado los máximos de altura de ola de cada 3 días de cada uno de los puntos de estudio. A partir de la población de máximos obtenida en cada celda se ha construido su correspondiente histograma de alturas de ola. En la Figura 6.12 se muestra un zoom del histograma de la celda 1 de la SOM de oleaje del Punto Norte. En esta selección de máximos de H_s cada 3 días se pueden introducir más condicionantes como, por ejemplo, seleccionar el máximo del último de los tres días. Sin embargo, con objeto de mostrar la metodología se ha optado por un criterio de selección más sencillo.

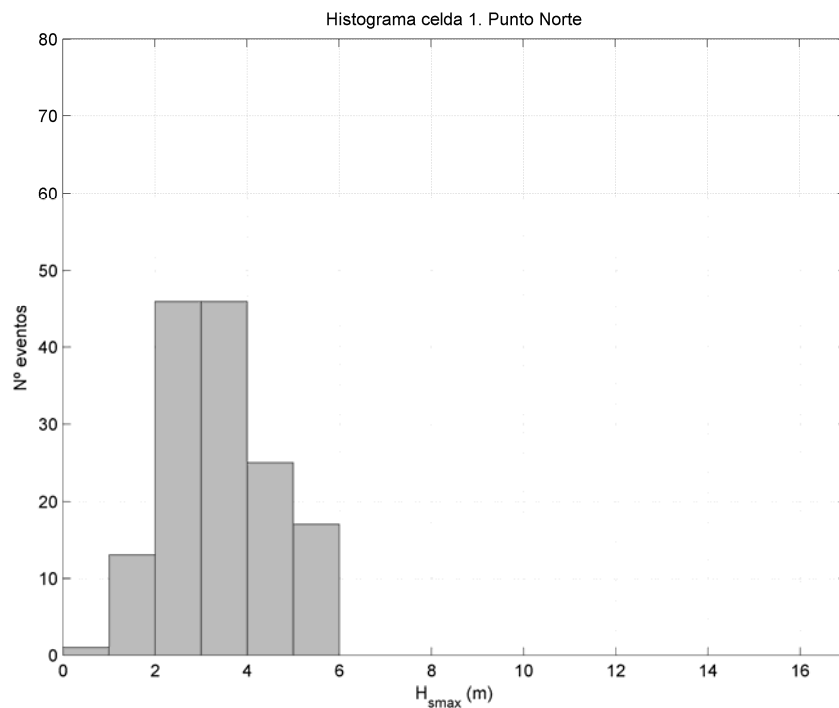


Figura 6.12 Histograma de alturas de ola significativa máxima 3-diaria de la celda 1 de la SOM de oleaje del Punto Norte

En cada celda se ha obtenido también el valor medio de la población de máximos 3-diaros y se ha representado en la SOM.

En la Figura 6.13, 6.14 y 6.15 se muestran los histogramas de la población de alturas de ola significativa máximas 3-diaras en cada celda de la SOM y la SOM de alturas de ola medias máximas, para cada uno de los tres puntos. En todos los histogramas el eje x representa las alturas de ola en metros (hasta 17 m) y el eje y representa el número de eventos (hasta 80), al igual que el histograma de la Figura 6.12.

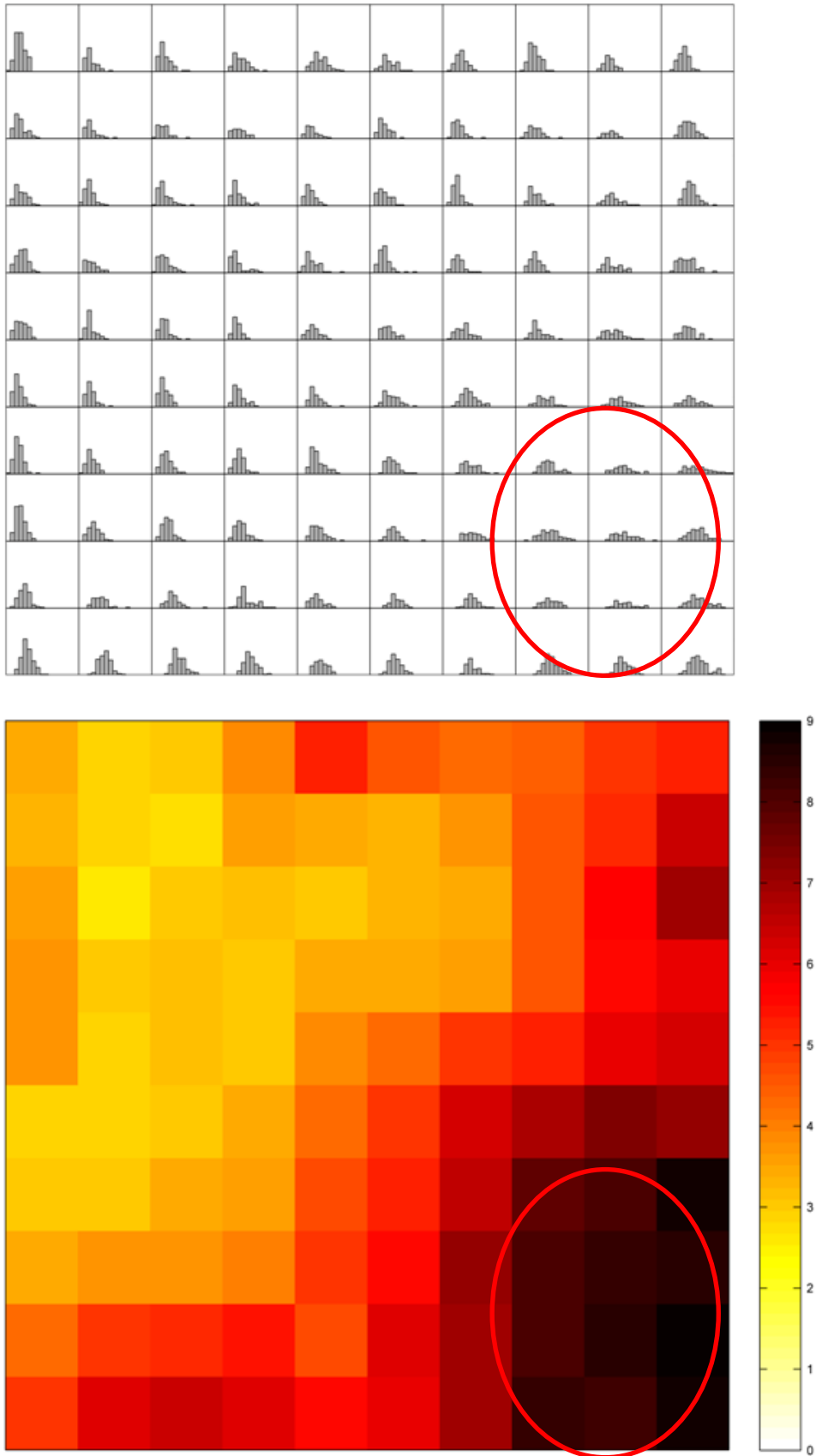


Figura 6.13 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaria para cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Punto Norte (NA).

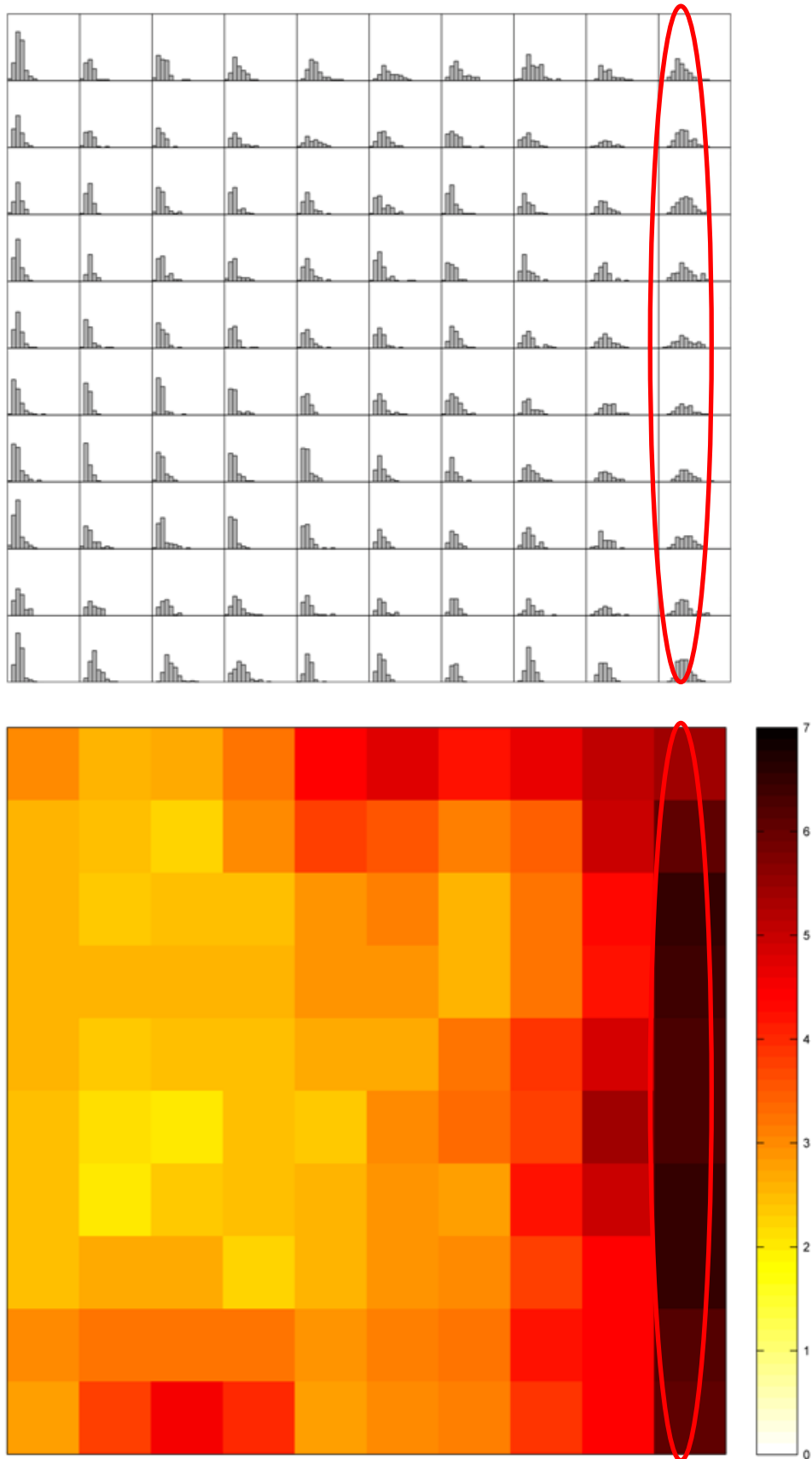


Figura 6.14 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaria cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Coruña (CO)

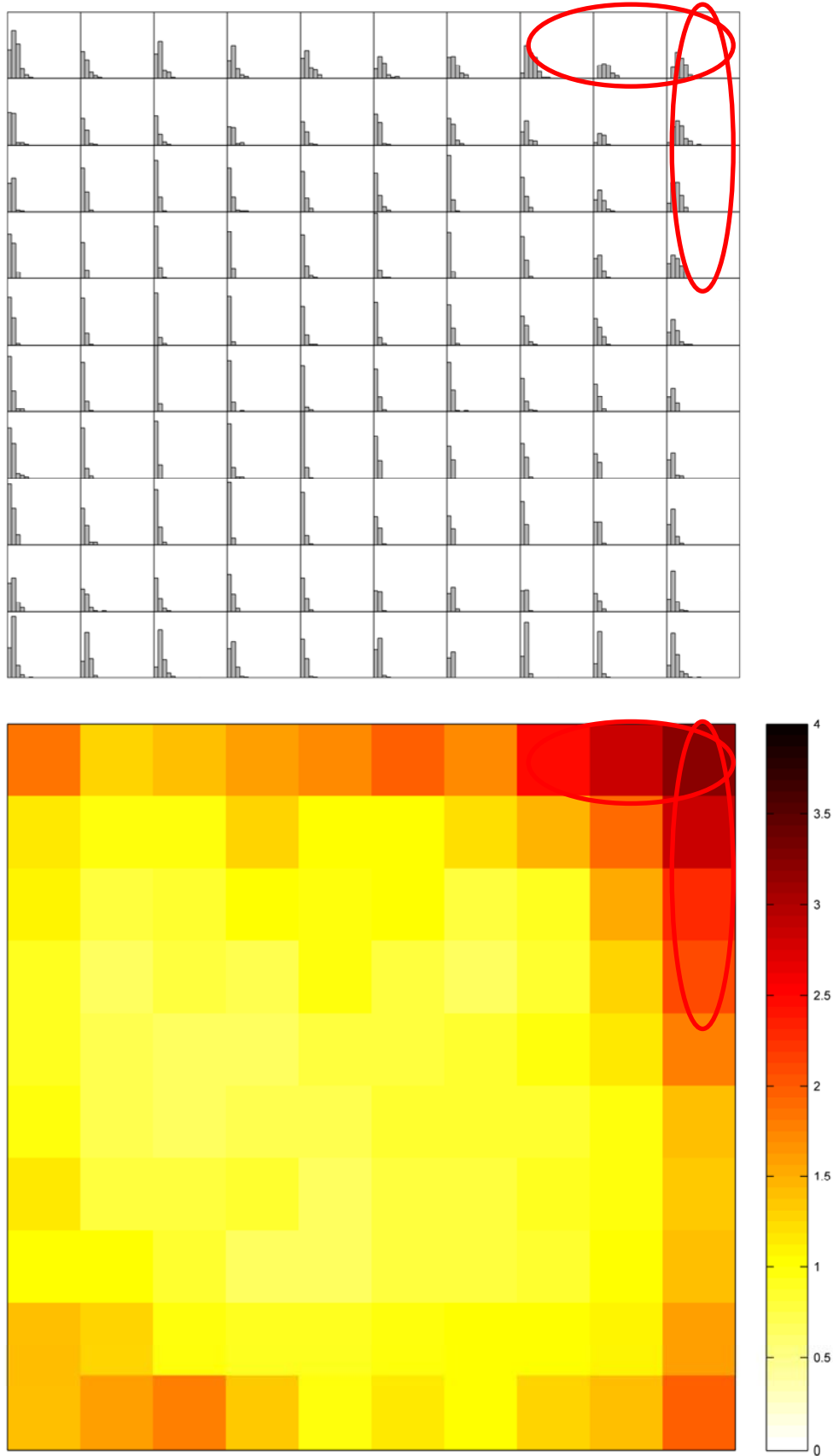


Figura 6.15 Histogramas de las poblaciones de datos de altura de ola significativa máxima 3-diaria para cada tipo de tiempo (el eje de abscisas representa alturas de ola entre 0 y 17 m) y SOM de alturas de ola significativa máxima media (m). Cádiz (CA)

Las situaciones rodeadas en rojo en cada figura son las que corresponden a las mayores olas. Los histogramas correspondientes a esas situaciones presentan mayor número de eventos en las mayores alturas de ola.

En general, se puede ver que las situaciones atmosféricas similares a la NAO son las que generan las mayores olas en el Punto Norte y Coruña, afectando en mayor medida al Punto Norte. Esta situación media corresponde a una borrasca situada sobre Islandia que genera oleajes del noroeste, los más energéticos de la zona. Dependiendo de la ubicación de los puntos de estudio, los tipos de tiempo que generan los oleajes más elevados varían, pero todos se encuentran próximos en la SOM.

Una vez definida la población de máximos que genera una determinada situación atmosférica el objetivo es poder determinar el régimen extremal de altura de ola correspondiente. Para ello se ha ajustado en cada punto un modelo estacionario basado en la función generalizada de extremos:

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right]_+^{-1/\xi} \right\} & \text{si } \xi \neq 0 \\ \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{x - \mu}{\psi} \right) \right] \right\} & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

donde $-\infty < \mu < \infty$ es el parámetro de localización, $\psi > 0$ es el parámetro de escala y ξ es el parámetro de forma.

La clasificación hecha por la SOM no tiene en cuenta la relación estacional, sino que se establecen unos tipos de tiempo que pueden ocurrir en cualquier época del año. Por esta razón la población de extremos de oleaje de cada celda no contiene esta información, permitiendo ajustar un modelo de extremos sencillo con parámetros constantes. El parámetro de forma se ha incluido en el ajuste siempre que su significancia estadística fuera superior al 95 %.

En las Figuras 6.16, 6.17 y 6.18 se muestran las SOM de los estimadores de los parámetros estacionarios de la GEV para los tres puntos de estudio. Se puede ver que la

variación de unas celdas a otras es suave, salvo en el caso del parámetro de forma al haberlo incluido sólo a un nivel de significancia del 95 %. Los valores de los parámetros de localización (μ) y escala (ψ) se encuentran en metros.

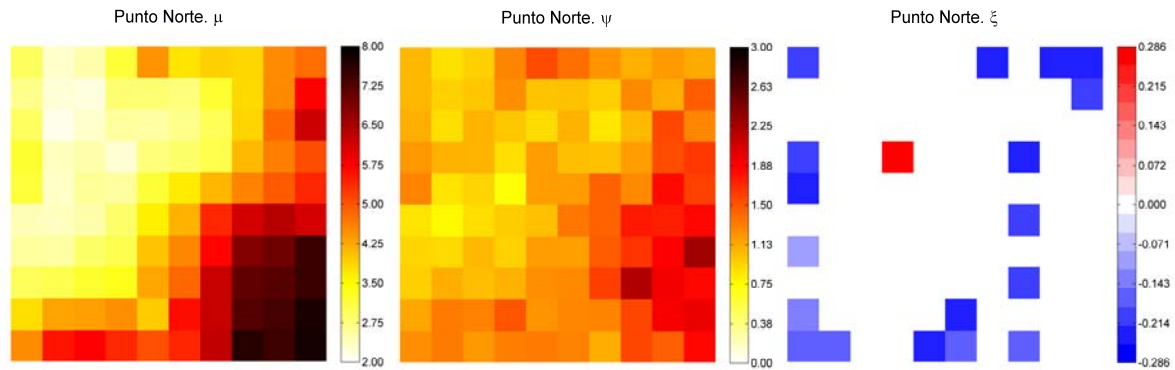


Figura 6.16 SOM de los parámetros de la GEV para el Punto Norte (NA)

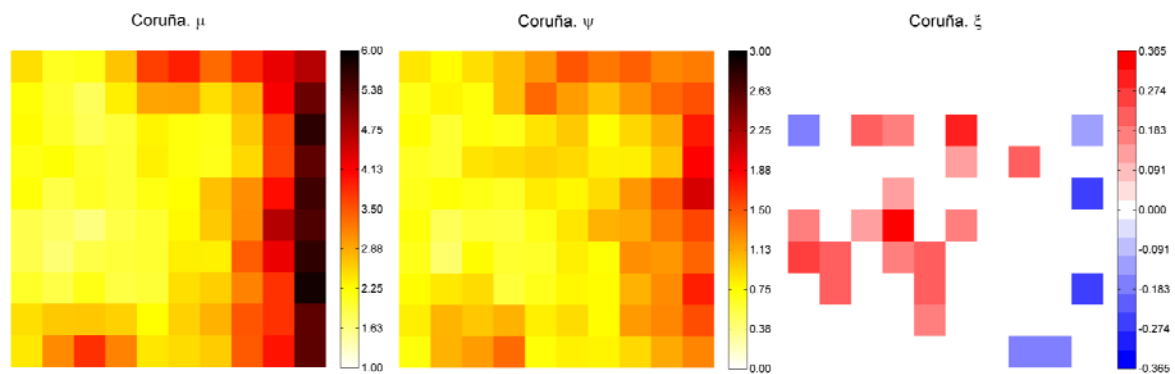


Figura 6.17 SOM de los parámetros de la GEV para Coruña (CO)

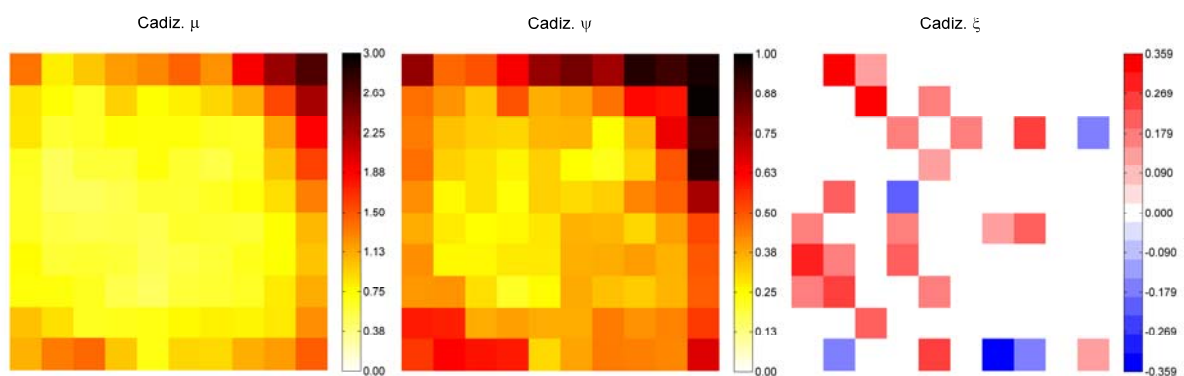


Figura 6.18 SOM de los parámetros de la GEV para Cádiz (CA)

A continuación se muestra la SOM con los regímenes extremales de oleaje correspondientes a cada tipo de tiempo para el Punto Norte (Figura 6.19). Los ejes de cada gráfico pueden verse en la ampliación del régimen de la celda 1, en la Figura 6.20.

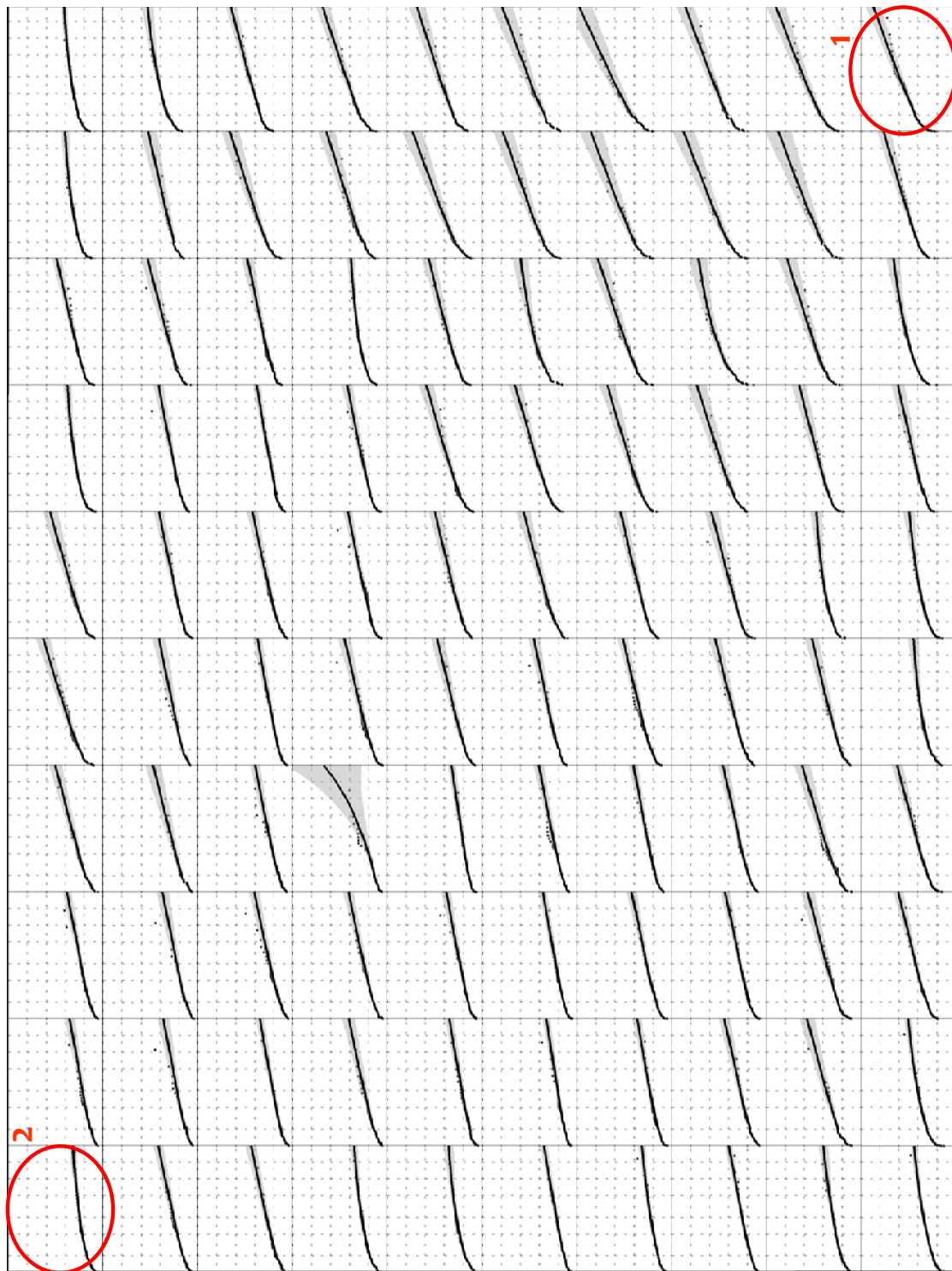


Figura 6.19 Regimenes extremales de oleaje para cada tipo de tiempo. Punto Norte

Se puede ver como dependiendo de la situación sinóptica, el régimen extremal de oleaje es distinto, siendo los más energéticos los correspondientes a las celdas de la esquina inferior derecha. Todos los regímenes se ajustan perfectamente a la población de datos con los que se han calculado (puntos negros) y las bandas de confianza al 95 %, de prácticamente todos, muestran una buena fiabilidad del ajuste. En la celda 34, la anchura de las bandas de confianza se debe al escaso número de eventos de oleaje de esa celda, lo que no ha permitido un buen ajuste.

En la Figura 6.20 se muestran el tipo de tiempo correspondiente a la celda inferior derecha (círculo rojo número 1) y el régimen extremal que genera y en la Figura 6.21 se muestran los gráficos equivalentes para la celda superior izquierda (círculo rojo número 2).

El caso de la Figura 6.20 muestra una situación atmosférica de clásica borrasca noratlántica. La borrasca situada bajo Islandia genera vientos que originan oleaje energético del noroeste que viaja por el Atlántico Norte.

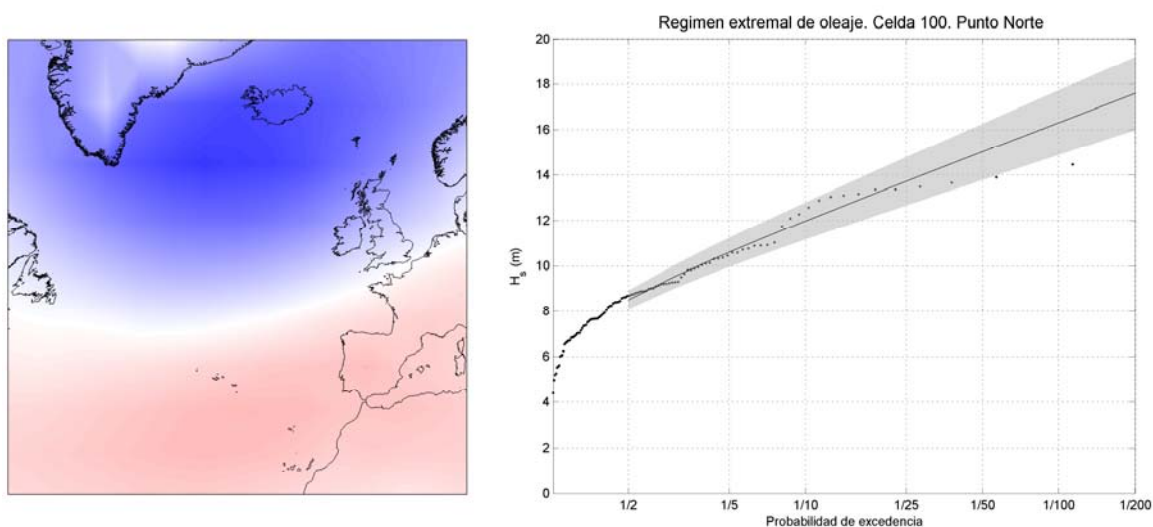


Figura 6.20 Tipo de tiempo correspondiente a la celda 100 y régimen extremal de oleaje que genera. Punto Norte (NA)

La Figura 6.21 muestra una situación atmosférica con altas presiones sobre el Reino Unido que puede generar ciertos oleajes del este que afectan al punto de estudio, dando lugar a un régimen extremal mucho más suave que el del caso anterior.

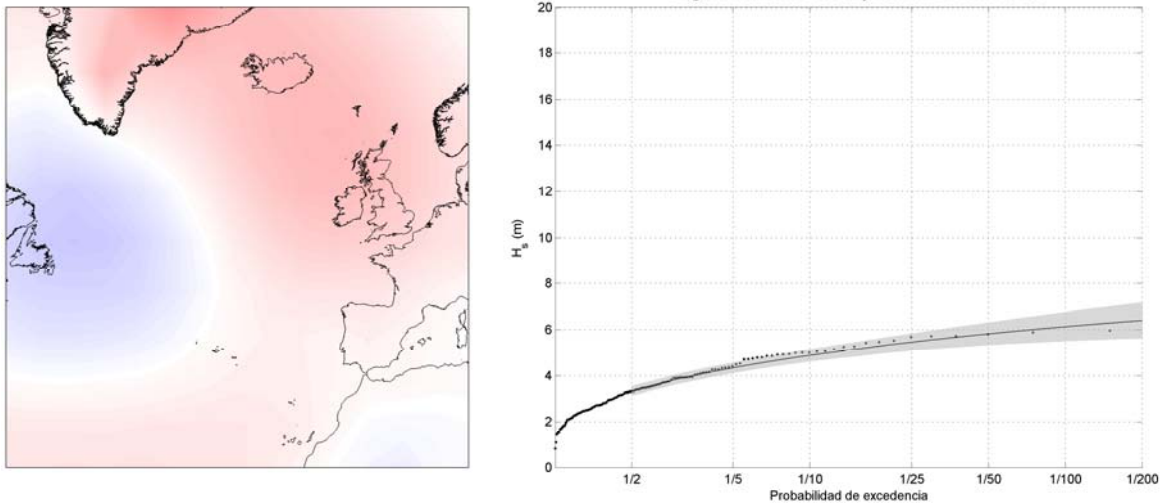


Figura 6.21 Tipo de tiempo correspondiente a la celda 1 y régimen extremal de oleaje que genera. Punto Norte (NA)

En las Figuras 6.22 y 6.23 se muestran los regímenes extremales de oleaje para los puntos de Coruña y Cádiz. Todos los regímenes muestran en el eje de abscisas probabilidades de excedencia hasta 1/200 y en el de ordenadas alturas de ola de hasta 20 m en el Punto Norte y Coruña y hasta 15 m en Cádiz. Se puede ver la mayor severidad del clima marítimo extremal del Punto norte y Coruña frente al de Cádiz que presenta regímenes extremales más suaves.

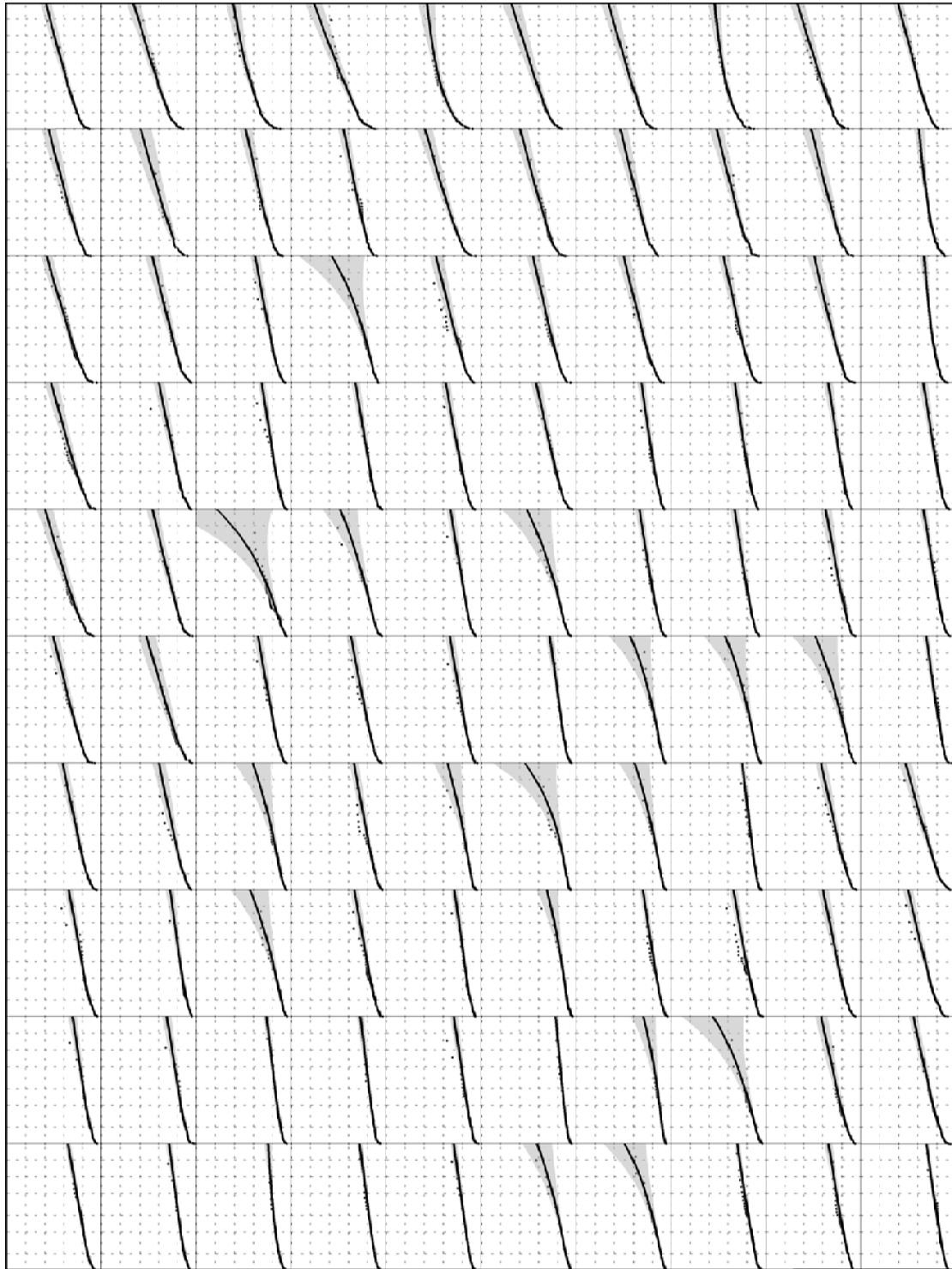


Figura 6.22 Regímenes extremales de oleaje para cada tipo de tiempo. Coruña

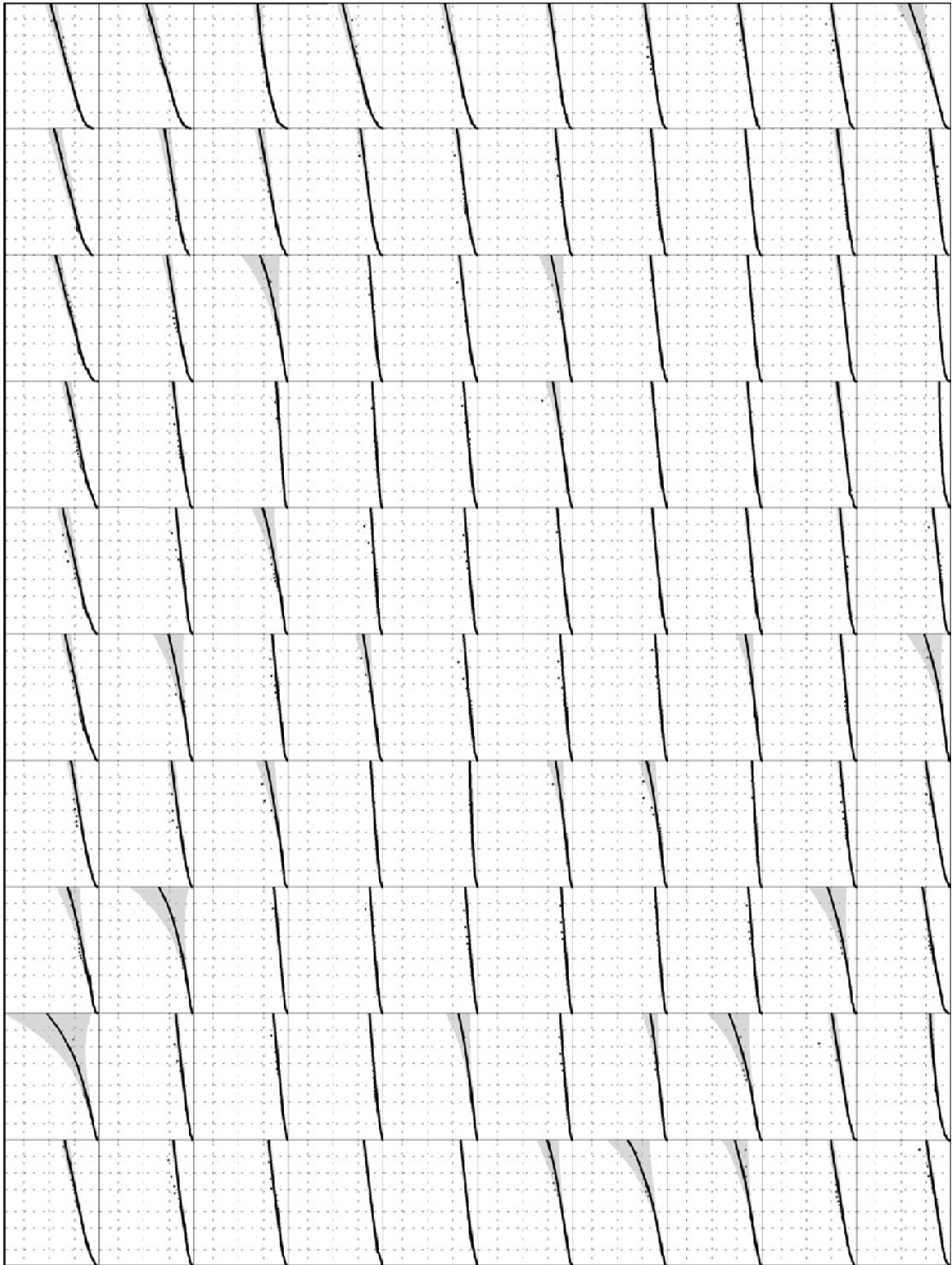


Figura 6.23 Regímenes extremos de oleaje para cada tipo de tiempo. Cádiz

El análisis presentado, que vincula situaciones sinópticas con regímenes extremales de oleaje, es una herramienta muy útil de predicción a corto plazo. Conocido el campo de presiones medio de tres días se puede inferir en el régimen extremal de oleaje que produce. Esta información es muy valiosa durante la fase de construcción de obras marítimas o para la explotación de rutas de barcos.

La metodología propuesta, basada en la climatología sinóptica, es capaz de identificar familias de oleaje debidas a un determinado tipo de tiempo y obtener su régimen extremal. Como se ha visto, en los tres puntos, los ajustes de los regímenes son muy buenos, lo que garantiza la buena aplicación de la metodología.

Los gráficos de probabilidad de ocurrencia estacional y mensual (Figuras 6.6 y 6.7) proporcionan una información muy valiosa que permite conocer qué regímenes extremales de cada punto son más probables en cada época del año.

Además, los regímenes extremales más severos permiten identificar los patrones de tiempo que generan situaciones de oleaje extremo excepcional en la zona.

6.5 Predicción a largo plazo: Régimen extremal de oleaje basado en el método POT

El estudio del régimen extremal de oleaje a medio plazo se centra en la variación estacional de los extremos. En este apartado se plantea una metodología para obtener el régimen extremal de oleaje de un punto de estudio a partir de los patrones de tiempo que generan los eventos extremos de oleaje. Se ha utilizado el método de excedencias sobre un umbral para seleccionar los eventos extremos de oleaje y, por lo tanto, las situaciones sinópticas que los generan, con el fin de obtener el clima marítimo extremal a partir de esta información.

La base de esta metodología está en la combinación del modelo estadístico de Pareto para extremos del oleaje con las situaciones sinópticas que generan esos extremos obtenidas a partir de la SOM. Por lo tanto, se trata de poder determinar las situaciones atmosféricas (tipos de tiempo) que generen los extremos de oleaje en el punto de estudio. A diferencia de la metodología anterior, en este caso no se trabaja con una SOM

de tipos de tiempo de la zona de influencia, sino con una SOM de tipos de tiempo generadores de extremos de oleaje en un punto. La Figura 6.24 muestra un esquema de la metodología:

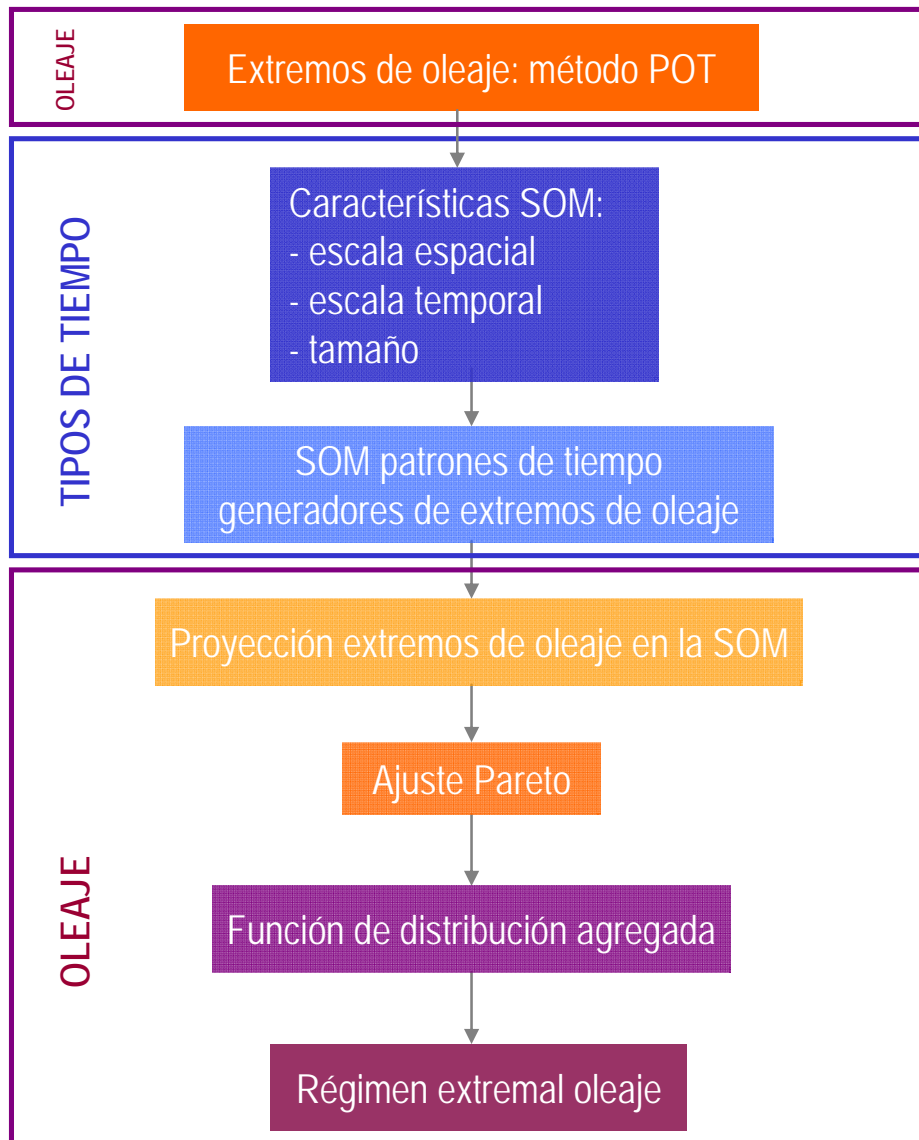


Figura 6.24 Metodología de predicción del régimen extremal de oleaje a largo plazo

La metodología se resume en los siguientes pasos:

- Obtención de valores extremos de oleaje determinados a partir de método de excedencias sobre un umbral.
- Determinación del tamaño de la SOM

- Obtención de la SOM de patrones de tiempo generadores de extremos de oleaje en el punto de estudio
- Proyección de los eventos extremos sobre la rejilla de la SOM
- Ajuste de un modelo de Pareto en cada celda de la SOM
- Cálculo de la función de distribución agregada a partir de los modelos de Pareto y la probabilidad de ocurrencia en la SOM
- Cálculo del régimen extremal a partir de la función de distribución agregada y la tasa de eventos extremos

6.5.1 Selección de los eventos extremos: método POT

El método elegido para seleccionar los eventos extremos de oleaje del punto de estudio ha sido el método de excedencias sobre un umbral. Se ha escogido este método puesto que garantiza la selección de los mayores eventos, que serán los que contribuyan al régimen extremal.

Este método requiere definir un valor para el umbral y otro para la independencia entre temporales (que garantice que todos los eventos elegidos son independientes). La independencia entre temporales está garantizada al haber seleccionado previamente los máximos de oleaje asociados a los campos de presiones medios 3-diaros. En lo que se refiere al umbral, su selección es un punto clave en ambas metodologías. En la primera, la proyección de los extremos seleccionados sobre la SOM de tipos de tiempo dará lugar a las “familias” de oleaje que producen eventos extremos de oleaje en el punto de estudio. En la segunda, se van a establecer las situaciones sinópticas que generan los extremos de oleaje seleccionados, por lo que además del umbral de oleaje también habrá que determinar el tamaño de la SOM.

En la Figura 6.25 se muestran los máximos 3-diaros de oleaje y las excedencias sobre el umbral correspondiente a la altura de ola del percentil del 90 %.

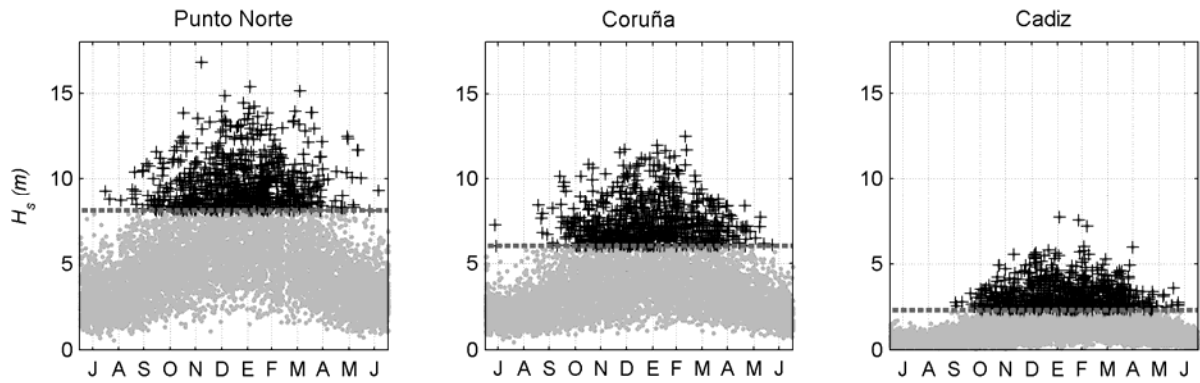


Figura 6.25 Excedencias de altura de ola (cruces negras) sobre el umbral (línea punteada) y máximos de oleaje 3-diaros para cada uno de los puntos de estudio

6.5.2 Situaciones sinópticas de estudio

En primer lugar, hay que seleccionar en el punto de estudio los eventos extremos de oleaje con los que se va a trabajar. La mejor o peor definición de las situaciones sinópticas que generan extremos de oleaje en el punto vendrá determinada por el número de eventos extremos seleccionados y el tamaño de la SOM. Ambos parámetros están directamente relacionados, puesto que el tamaño de la SOM definirá el número de familias de oleaje extremos a determinar, y el valor del umbral determinará el número de extremos que serán volcados en la SOM y, por lo tanto, en cada familia. El conocimiento de la variabilidad climática de la zona es fundamental para poder decidir el valor del umbral y el tamaño de la SOM. En este trabajo se han realizado varias pruebas con distintos umbrales y diferentes tamaños de SOM. Finalmente se ha elegido como valor del umbral la altura de ola correspondiente al percentil del 90 % y un tamaño de SOM de 4×4 . La experiencia aportada por diversos estudios en la zona ha sido clave para decidir el tamaño de la SOM y el valor del umbral se ha escogido al aportar un número adecuado de extremos a proyectar en la SOM.

Los eventos extremos de oleaje en cada punto de estudio habrán sido generados por una determinada evolución atmosférica. Haciendo uso de la climatología sinóptica se van a establecer, para cada punto de estudio, los tipos de tiempo que produjeron esos eventos extremos.

A diferencia del apartado anterior, solo se van a clasificar aquellos instantes de tiempo en los que ocurrió el evento extremo. Por lo tanto, en este caso, cada punto de estudio tiene su propia SOM de tipos de tiempo.

Antes de aplicar la SOM se realiza un análisis por componentes principales para reducir la dimensionalidad del problema, y al igual que antes, se seleccionan los 10 primeros modos, que representan más del 90 % de la varianza. En este caso, en vez de entrenar la SOM con toda la serie de modos temporales, solo se entrenarán los instantes correspondientes a las excedencias de oleaje. En el caso del Punto Norte se trabaja con 742 instantes, en Coruña con 736 y en Cádiz con 740.

Además de los tipos de tiempo, la SOM proporciona los gráficos de probabilidad de ocurrencia de cada centroide. Esta información se complementa con la tasa de ocurrencia de eventos anual ν , estacional $\{\nu_{DEF}, \nu_{MAM}, \nu_{JJA}, \nu_{SON}\}$ o mensual $\{\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{12}\}$.

6.5.2.1 Punto Norte

La SOM de tipos de tiempo generadores de los extremos de oleaje en el Punto Norte se muestra en la Figura 6.26.

Las situaciones atmosféricas que generan los oleajes extremos en el Punto Norte son variantes de la situación sinóptica correspondiente a la NAO. En todos los casos se sitúa una borrasca en las inmediaciones de Islandia y anticiclón próximo a las Azores. Las variaciones radican fundamentalmente en la posición del centro de bajas presiones que influirá en la dirección del oleaje que llega al punto de estudio. Las situaciones presentadas originan oleajes que llegan al punto con dirección del noroeste o norte.

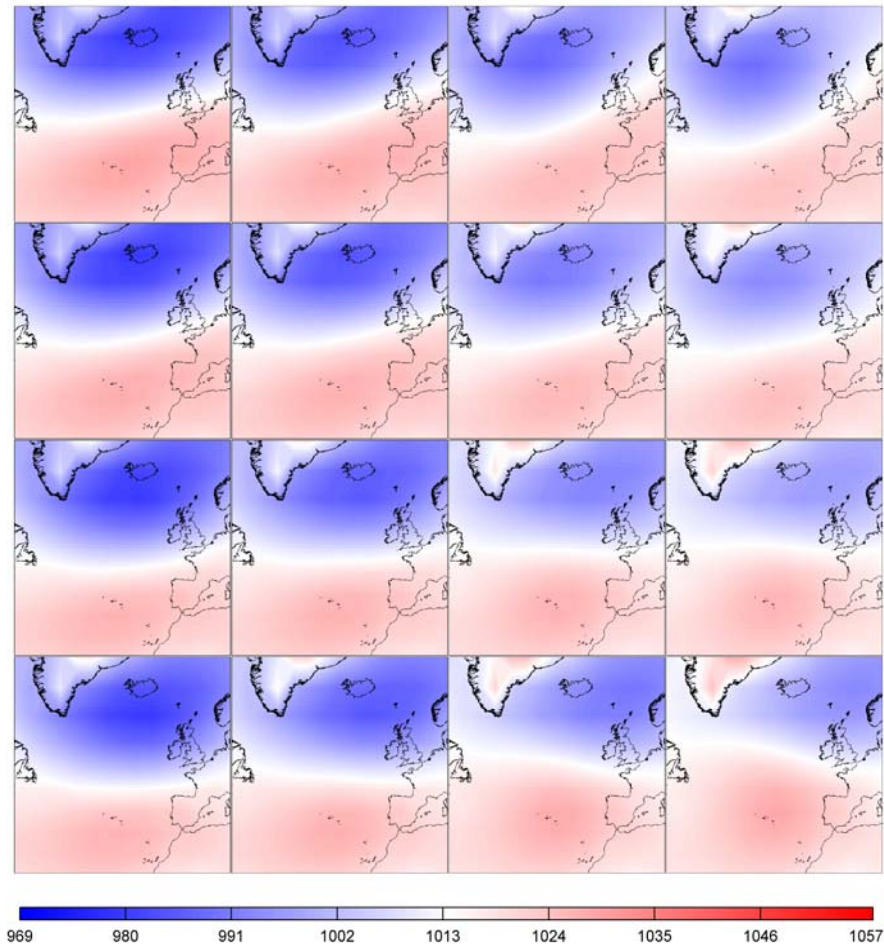


Figura 6.26 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diaras (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en el Punto Norte

La Figura 6.27 muestra la SOM de probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo.

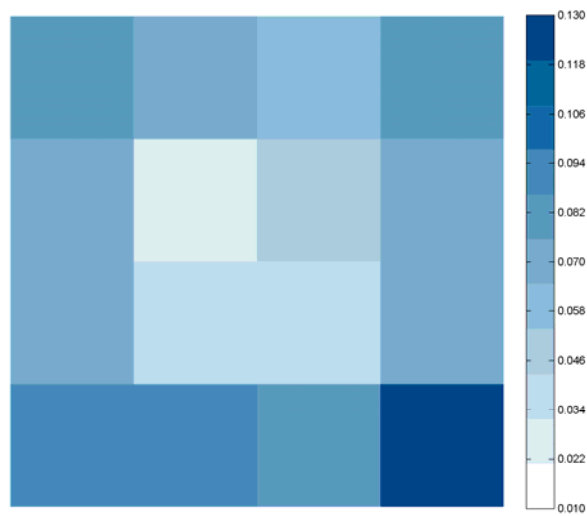


Figura 6.27 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte

La información complementaria a este gráfico es la tasa de ocurrencia anual de eventos extremos que es $\nu = 12.1639 \text{ año}^{-1} (\text{yr}^{-1})$. A partir de la información del número de centroides por celda se puede construir el gráfico de tasas de ocurrencia por celda, ν_i ,

(Figura 6.26). La tasa de ocurrencia anual, ν , se define entonces como $\nu = \sum_{i=1}^N \nu_i$.

Las probabilidades de ocurrencia de la Figura 6.28 y la tasa de ocurrencia anual serán determinantes para calcular el régimen extremal de clima marítimo en el Punto Norte.

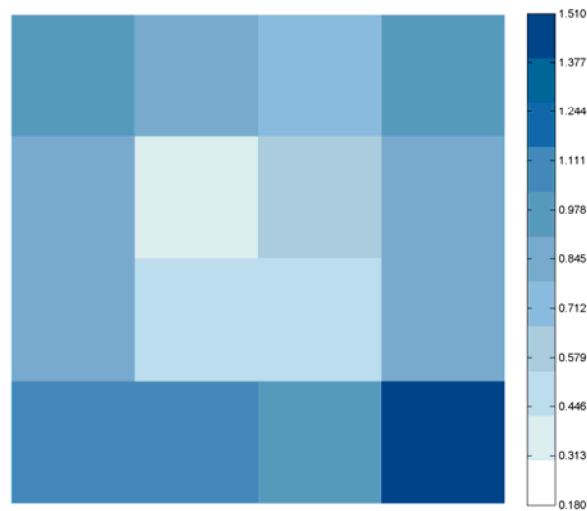


Figura 6.28 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte

Teniendo en cuenta la información sobre los instantes en los que ocurrieron los eventos extremos (con los que se ha entrenado la SOM) se pueden construir los gráficos de probabilidad de ocurrencia estacional y mensual (Figuras 6.29 y 6.30).

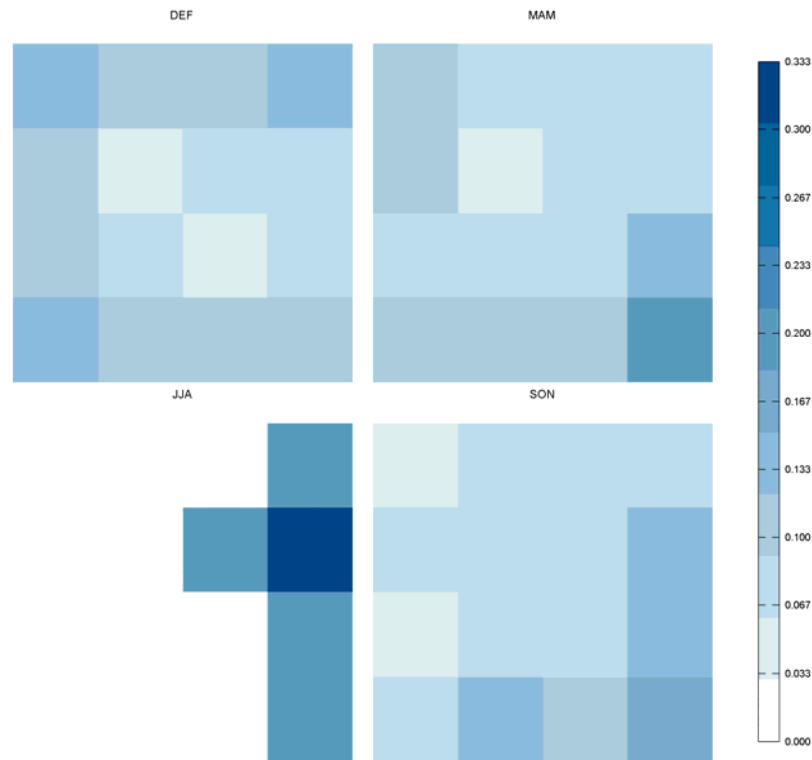


Figura 6.29 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte

En este gráfico se puede ver que en los meses de Junio, Julio y Agosto las situaciones sinópticas que generan extremos de oleaje se reducen a 5, mientras que en el resto de estaciones se dan todos los tipos de tiempo.

Las tasas de ocurrencia por estaciones toman los valores: $\nu_{DEF} = 7 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{MAM} = 2.082 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{JJA} = 0.098 \text{ yr}^{-1}$ y $\nu_{SON} = 2.983 \text{ yr}^{-1}$. Estos valores complementan los mapas de probabilidad de la Figura 6.28. Expresados en términos de porcentaje, estos valores informan del reparto de los extremos en los meses del año: 57.55 % de eventos en invierno, 17.12 % en primavera, 0.81 % en verano y 24.52 % en otoño.

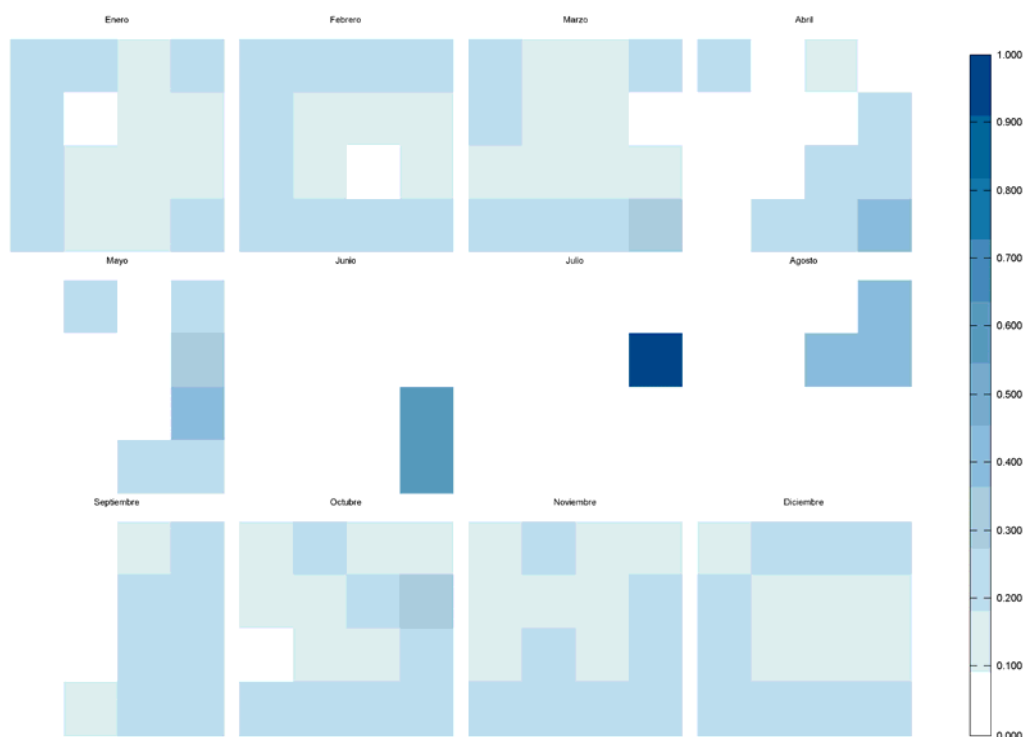


Figura 6.30 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en el Punto Norte

En el gráfico de la Figura 6.30 se muestran las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo para cada mes. Salvo en los meses de Noviembre y Diciembre, en los que se dan todos los tipos de tiempo, en el resto de los meses, hay ciertas situaciones sinópticas que no ocurren nunca.

Las tasas de ocurrencia mensuales se muestran en la Tabla 6.1:

Meses	E	F	M	A	May	J	Jul	Ag	S	O	N	D
ν_{mcs} (yr ⁻¹)	2.42	2.06	1.44	0.42	0.21	0.03	0.01	0.05	0.34	1.05	1.59	2.51

Tabla 6.1 Tasas de ocurrencia mensuales del Punto Norte

6.5.2.2 Coruña

La Figura 6.31 muestra los tipos de tiempo generadores de los eventos extremos de oleaje en Coruña.

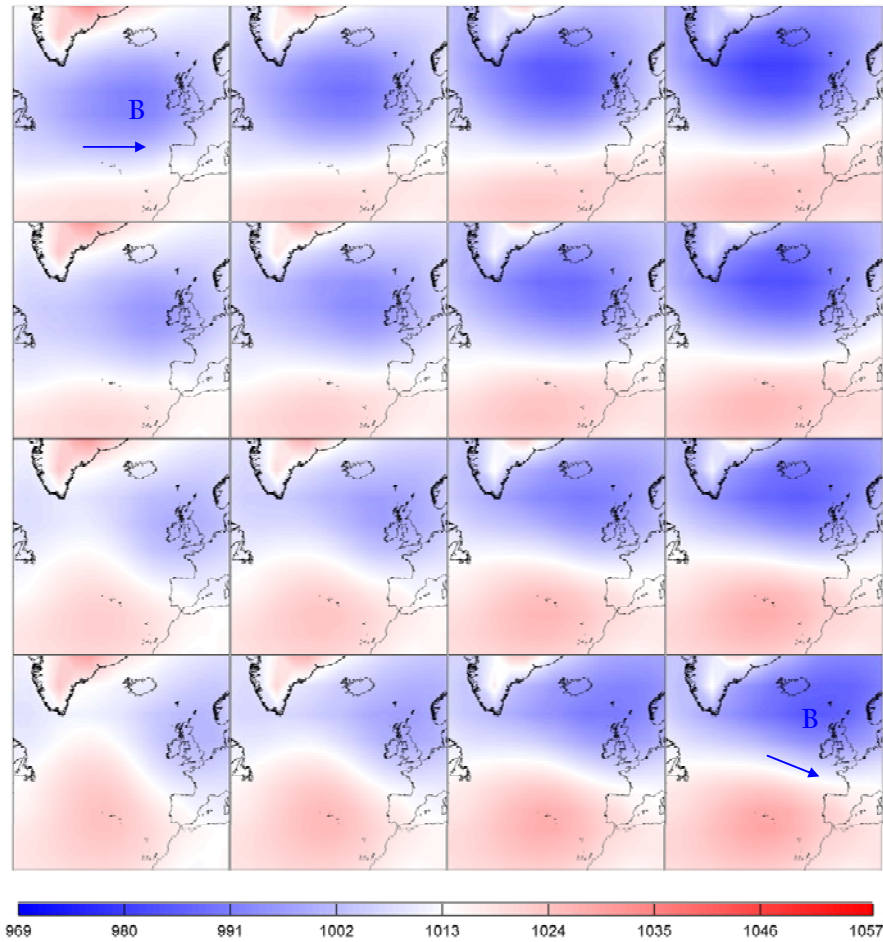


Figura 6.31 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diarías (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en Coruña

Los oleajes extremos en este punto son generados por distintos tipos de tiempo que en el Punto Norte. En este caso la borrasca se sitúa, en la mayoría de los casos, desplazada hacia el sureste, con el centro de bajas localizado próximo, o sobre, las Islas Británicas. Estas situaciones producen oleajes de dirección oeste y oeste-noroeste, que son los que más afectan al punto de Coruña. En las celdas superior izquierda e inferior derecha de la SOM de la Figura 6.31 se muestra con una B la posición del centro de bajas presiones y con una flecha la dirección del oleaje que genera.

Las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo se muestran en la Figura 6.32 y las tasas de ocurrencia por celda en la Figura 6.33. La tasa de ocurrencia de eventos anual de Coruña es $\nu = 12.065 \text{ yr}^{-1}$.

En la Figura 6.32 se puede ver que los tipos de tiempo más probables son los situados en las esquinas opuestas de la SOM, que generan oleajes del oeste y oeste-noroeste.

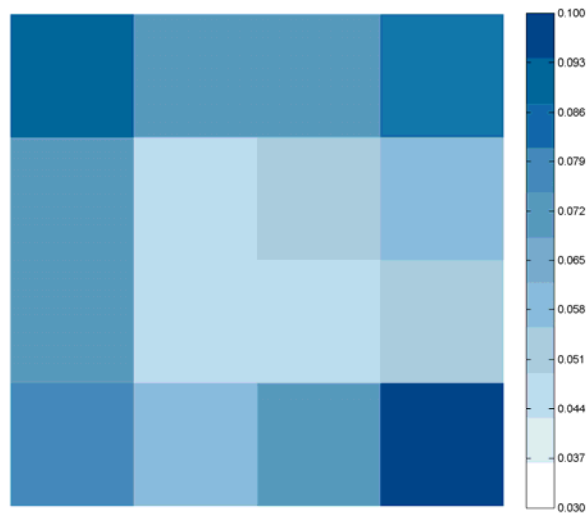


Figura 6.32 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña

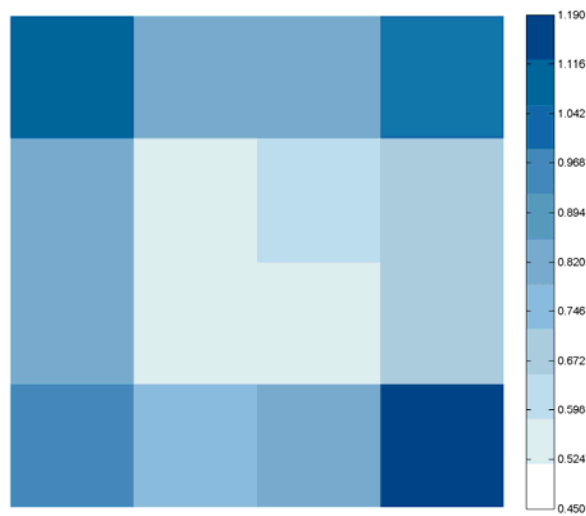


Figura 6.33 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña

En el gráfico 6.34 se muestran las probabilidades de ocurrencia por estaciones.

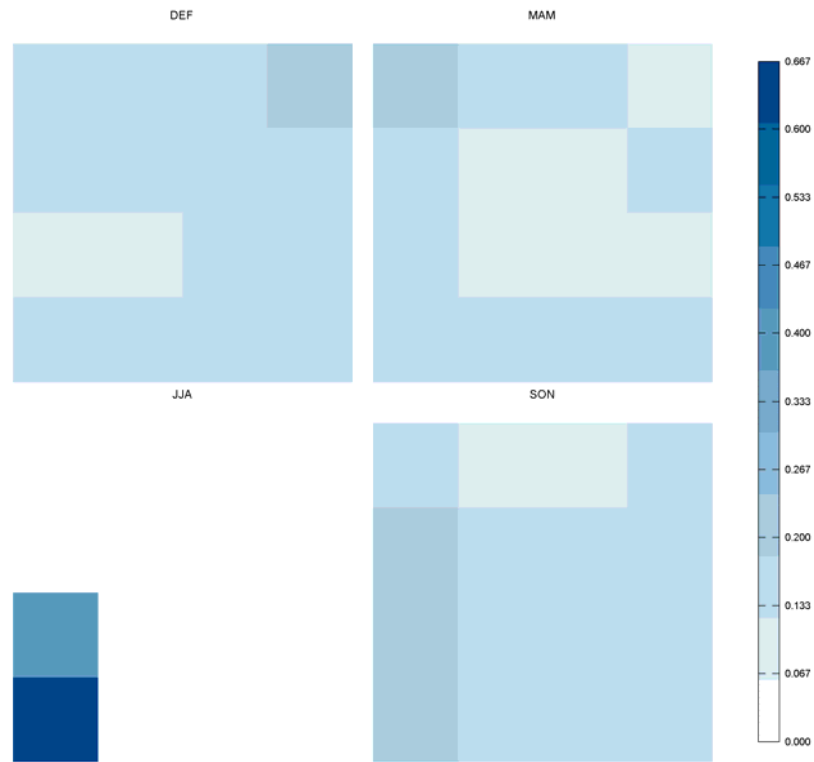


Figura 6.34 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña

En estos gráficos se puede ver que en verano, solo hay probabilidad de encontrar dos tipos de situaciones sinópticas que generan oleajes extremos, las cuales se corresponden con una borrasca de baja intensidad situada fuera del área de influencia, probablemente sobre el norte de Europa.

Las tasas de ocurrencia por estaciones toman los valores: $\nu_{DEF} = 7.147 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{MAM} = 2.229 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{JJA} = 0.049 \text{ yr}^{-1}$ y $\nu_{SON} = 2.639 \text{ yr}^{-1}$.

Por último, la Figura 6.35 muestra las probabilidades de ocurrencia mensuales.

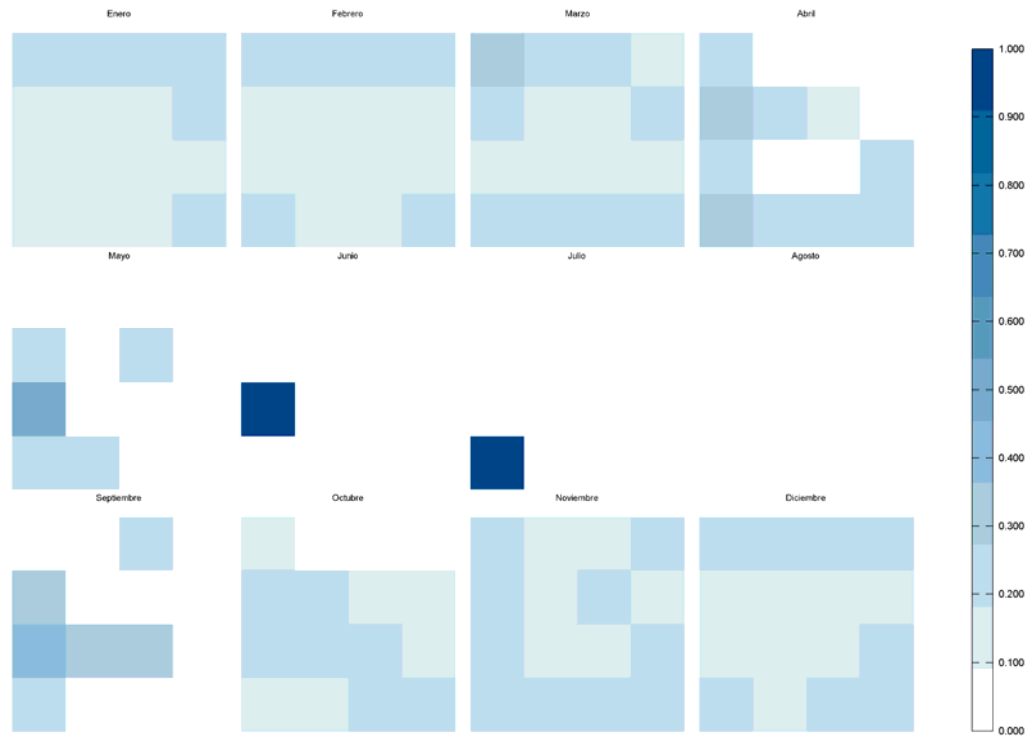


Figura 6.35 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña

En este caso en el mes de Agosto, no se produce ninguna situación sinóptica que genere extremos de oleaje en Coruña, y en los meses de Junio y Julio solo se encuentra un tipo de tiempo en cada mes que genera eventos extremos.

Las tasas de ocurrencia mensuales se muestran en la Tabla 6.2:

Meses	E	F	M	A	May	J	Jul	Ag	S	O	N	D
U_{mcs} (yr ⁻¹)	2.426	2.131	1.442	0.573	0.213	0.016	0.032	0	0.196	0.918	1.524	2.590

Tabla 6.2 Tasas de ocurrencia mensuales de Coruña

6.5.2.3 Cádiz

En la Figura 6.36 se muestra la SOM de tipos de tiempo generadores de los extremos en Cádiz.

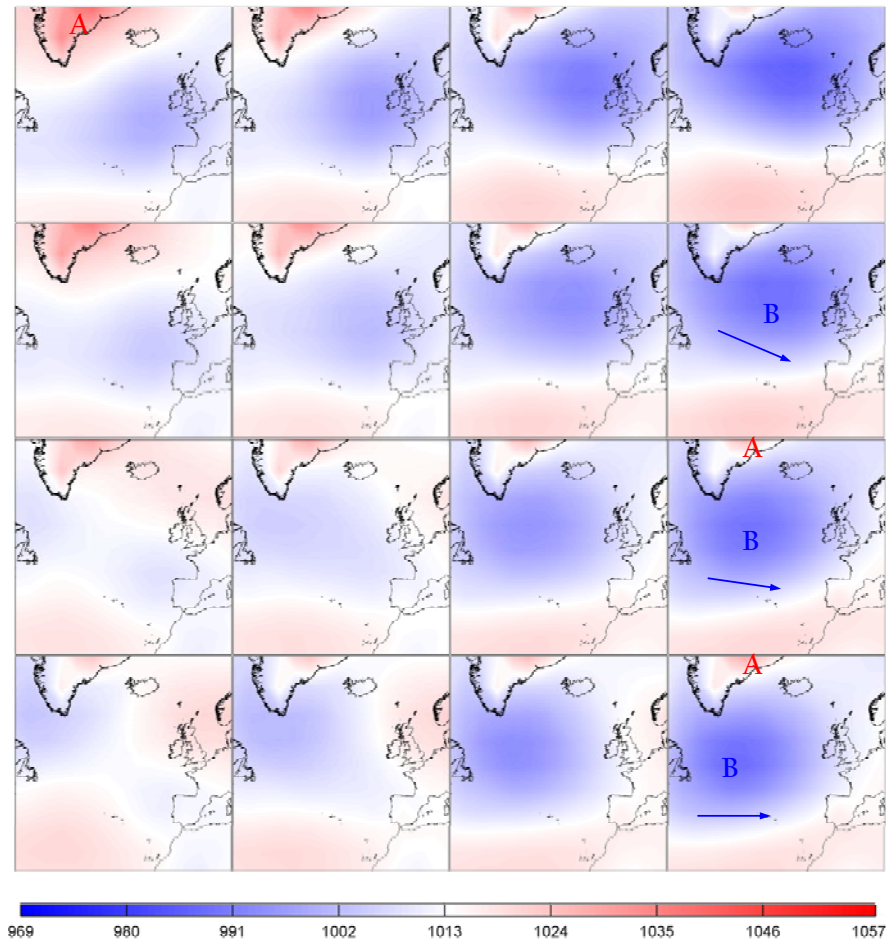


Figura 6.36 Tipos de tiempo de presiones medias 3-diarías (mb) generadores de los eventos extremos de oleaje en Cádiz

Estos tipos de tiempo obtenidos son completamente distintos a los de los otros dos puntos de estudio. En este caso el centro de la borrasca se sitúa generalmente al este de las Islas Británicas y su influencia llega hasta el sur de España, donde introduce vientos del noroeste que afectan directamente al punto de estudio (centro de la borrasca y dirección del oleaje representados por una B y una flechas en 3 celdas de la SOM de la Figura 6.36). Además en la mayoría de los casos un anticiclón sobre la zona de Groenlandia bloquea la borrasca que introduce oleaje.

Las probabilidades de ocurrencia se muestran en la Figura 6.37 y las tasas de ocurrencia de eventos por tipo de tiempo se presentan en la Figura 6.38. La tasa de ocurrencia anual de eventos extremos es $\nu = 12.1311 \text{ yr}^{-1}$.

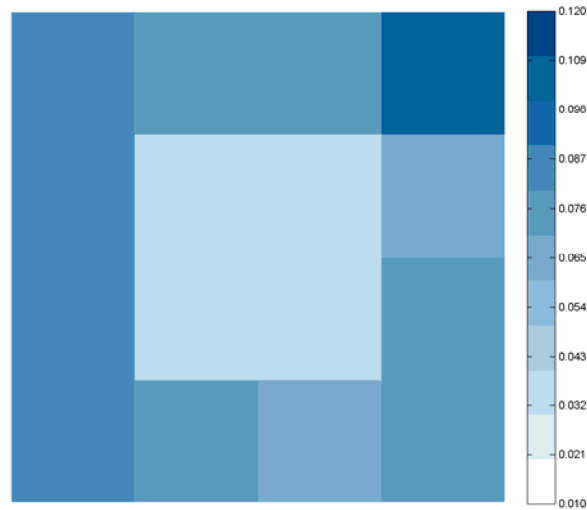


Figura 6.37 Probabilidades de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz

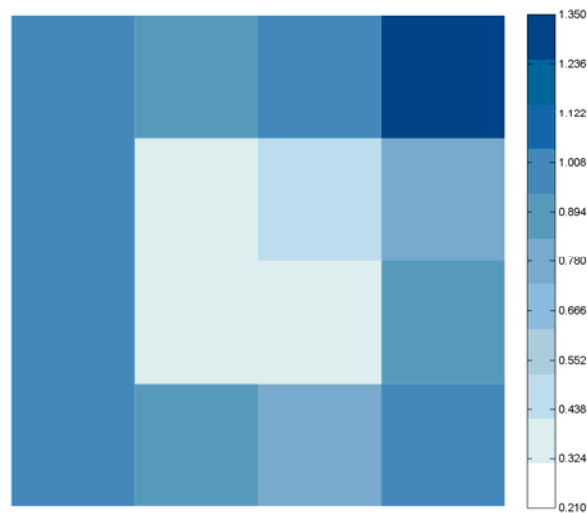


Figura 6.38 Tasas de ocurrencia en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz

El gráfico 6.37 muestra el tipo de tiempo de la celda superior derecha de la SOM como el más probable en ocurrir y, por lo tanto, el que más eventos extremos de oleaje produce. La situación sinóptica corresponde a un centro de bajas presiones al este de las Islas Británicas cuya influencia llega hasta el norte de la Península Ibérica. Esta situación genera oleaje del noroeste que incide en el punto de estudio.

La Figura 6.39 muestra la probabilidad de ocurrencia por estaciones.

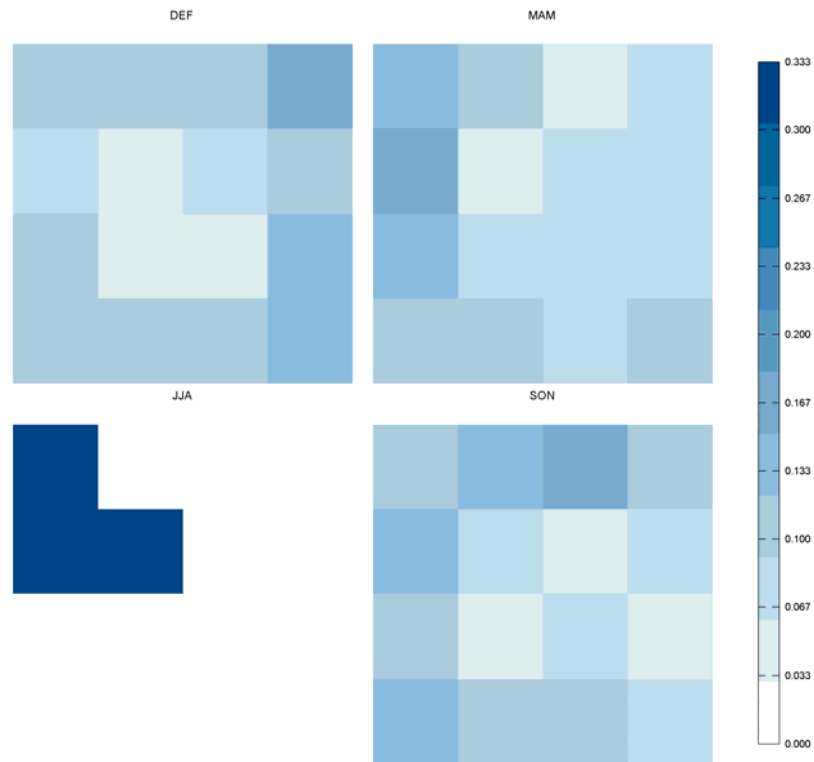


Figura 6.39 Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Coruña

Dentro de cada mes se muestra la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de tiempo. En todas las estaciones, salvo en verano, hay probabilidad de encontrar cualquiera de los tipos de tiempo que generan extremos en la zona.

Las tasas de ocurrencia de eventos por estaciones toman los valores: $\nu_{DEF} = 6.705 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{MAM} = 3.262 \text{ yr}^{-1}$, $\nu_{JJA} = 0.049 \text{ yr}^{-1}$ y $\nu_{SON} = 2.114 \text{ yr}^{-1}$.

En la Figura 6.40 se muestran las probabilidades de ocurrencia mensuales de la SOM de Cádiz.



Figura 6.40 Probabilidades de ocurrencia por meses en la SOM de los tipos de tiempo generadores de los oleajes extremos en Cádiz

En este caso los meses de Julio y Agosto no presentan probabilidad de ocurrencia de ninguna de las situaciones que generan eventos extremos de oleaje. Enero es el único mes en el que hay probabilidad de encontrar todas las situaciones sinópticas clasificadas.

Las tasas de ocurrencia mensuales se muestran en la Tabla 6.3:

Meses	E	F	M	A	May	J	Jul	Ag	S	O	N	D
$\nu_{mes} (yr^{-1})$	2.393	2.147	2.114	0.836	0.311	0.049	0	0	0.049	0.655	1.409	2.163

Tabla 6.3 Tasas de ocurrencia mensuales de Cádiz

6.5.3 Regímenes extremales de oleaje para cada situación sinóptica

Las intensidades de los extremos se van a modelar con la Distribución Generalizada de Pareto (6.2), que junto con las frecuencias (tasas de ocurrencia) obtenidas van a permitir obtener la distribución del máximo anual.

En lo que respecta a la información empírica sobre las frecuencias se va a utilizar el parámetro ν denominado tasa de ocurrencia de eventos, definido como el número de eventos λ durante el intervalo de tiempo T (yr^{-1}):

$$\nu = \frac{\lambda}{T} \tag{6.2}$$

La proyección de los extremos de oleaje sobre la rejilla de la SOM permitirá ajustar, en cada celda, un modelo de Pareto que definirá el régimen extremal para el tipo de tiempo correspondiente.

La proyección de los extremos de oleaje sobre el espacio de la SOM proporciona una población de extremos (familia) generada por cada situación sinóptica. El modelado de las excedencias sobre el umbral de cada familia de oleaje mediante Pareto permite establecer una función de distribución en cada celda de la SOM. Basándonos en la experiencia de estudios anteriores con la distribución de Pareto, se ha fijado un mínimo de 20 eventos para poder ajustar la función. Además, se ha rechazado el modelo en aquellas celdas en las que el ajuste (a pesar de haber un número suficiente de datos) no ha sido bueno. En aquellas celdas en las que no se ha utilizado el modelo estadístico se ha hecho uso de la función de distribución empírica.

A continuación, se muestran los resultados del ajuste del modelo de Pareto en cada celda de la SOM de los tres puntos de estudio. En todos los puntos se han obtenido los diagnósticos gráficos cuantil-cuantil y probabilidad-probabilidad del modelo ajustado en cada celda pero, tan solo se van a mostrar los gráficos de Coruña, ya que los otros son similares.

6.5.3.1 Punto Norte

Se han proyectado las excedencias sobre el umbral de oleaje en el Punto Norte sobre la rejilla de la SOM. En la Figura 6.41 se muestra la SOM del valor medio de H_s para cada celda de la SOM.

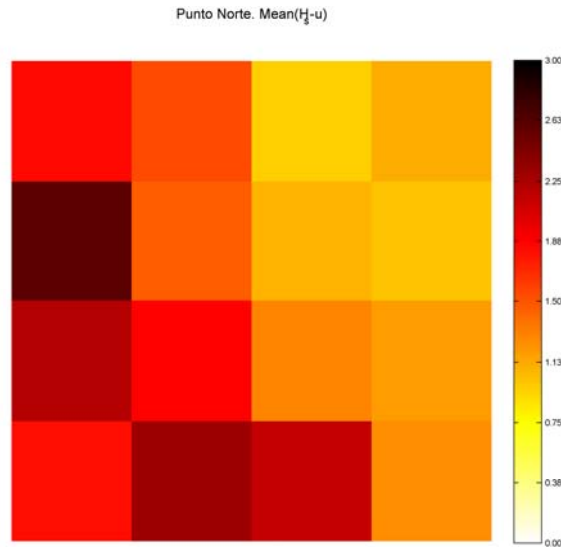


Figura 6.41 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje del Punto Norte

En la Figura 6.42 se muestran los histogramas adimensionalizados (área=1) de las excedencias en cada celda de la SOM, junto con la función de densidad del modelo de Pareto ajustado por el método de máxima verosimilitud.

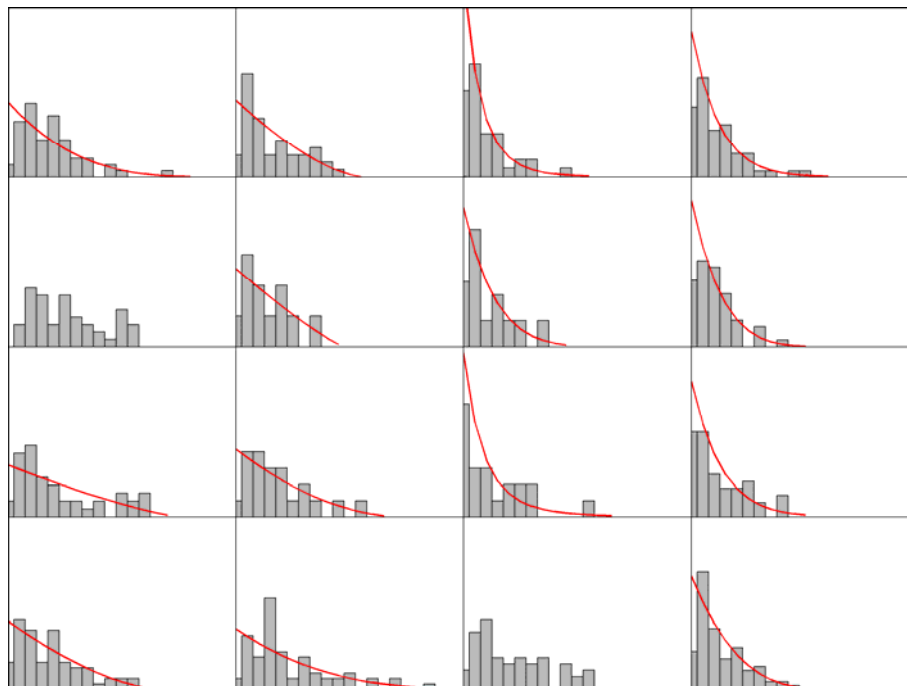


Figura 6.42 Histogramas y funciones de densidad (línea roja) de Pareto para cada población de excedencias de la SOM del Punto Norte

En las celdas donde no está pintada la función de densidad de Pareto el ajuste del modelo no es bueno, por lo que ha sido rechazado y se utiliza la distribución empírica.

6.5.3.2 Coruña

La Figura 6.43 muestra la proyección en la SOM de la media de las excedencias sobre el umbral en Coruña.

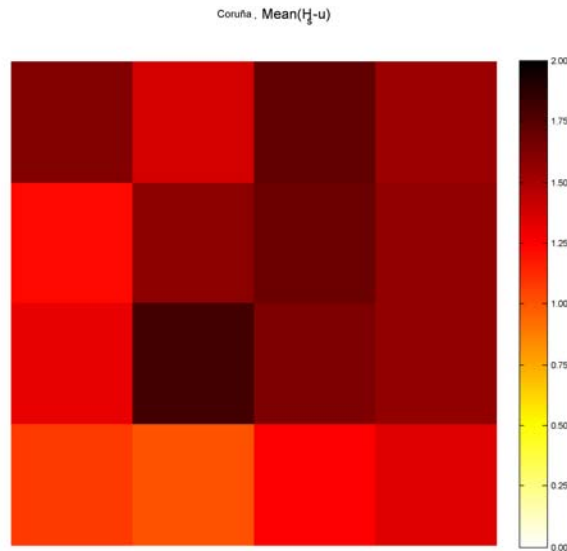


Figura 6.43 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje de Coruña

En la Figura 6.44 se muestran los histogramas adimensionalizados de las excedencias en cada celda de la SOM, junto con la función de densidad del mejor modelo de Pareto.

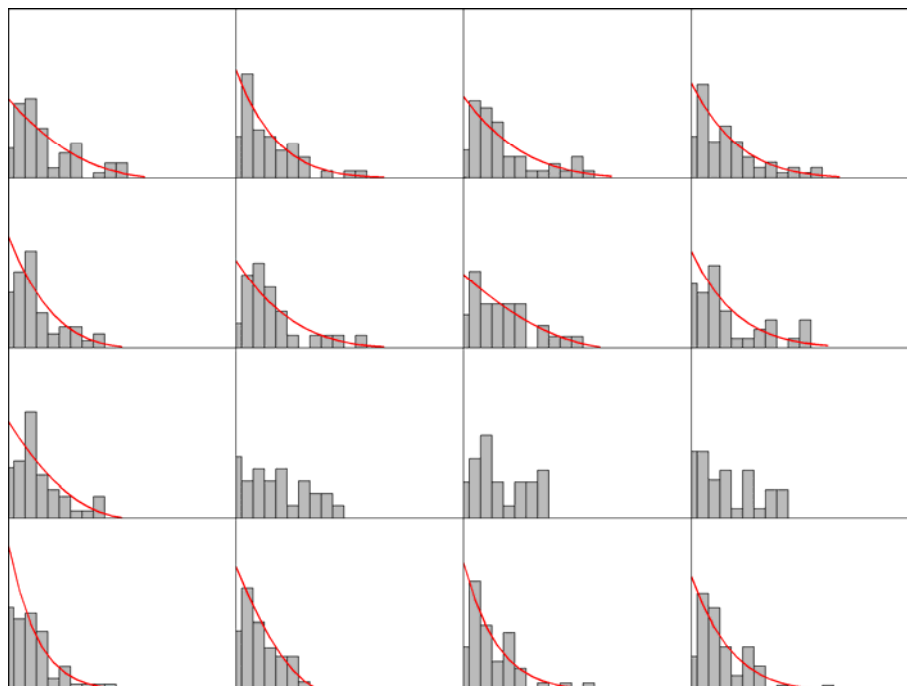


Figura 6.44 Histogramas y funciones de densidad de Pareto para cada población de excedencias de la SOM de Coruña

El diagnóstico gráfico de los ajustes de los modelos en Coruña se muestra en las Figuras 6.45 y 6.46 con los gráficos QQ y PP.

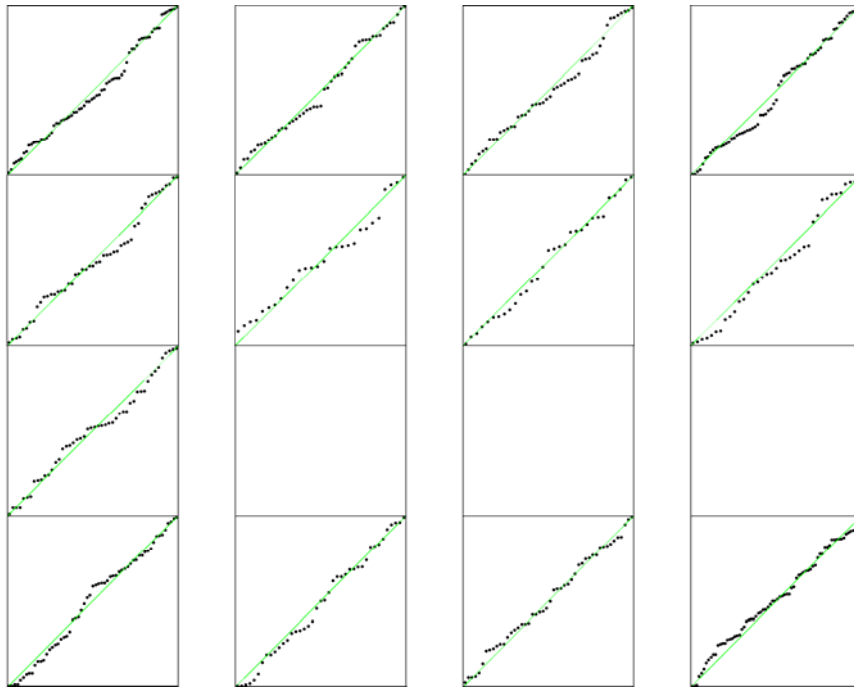


Figura 6.45 Diagnóstico gráfico mediante *QQ plot* de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias en la SOM de Coruña

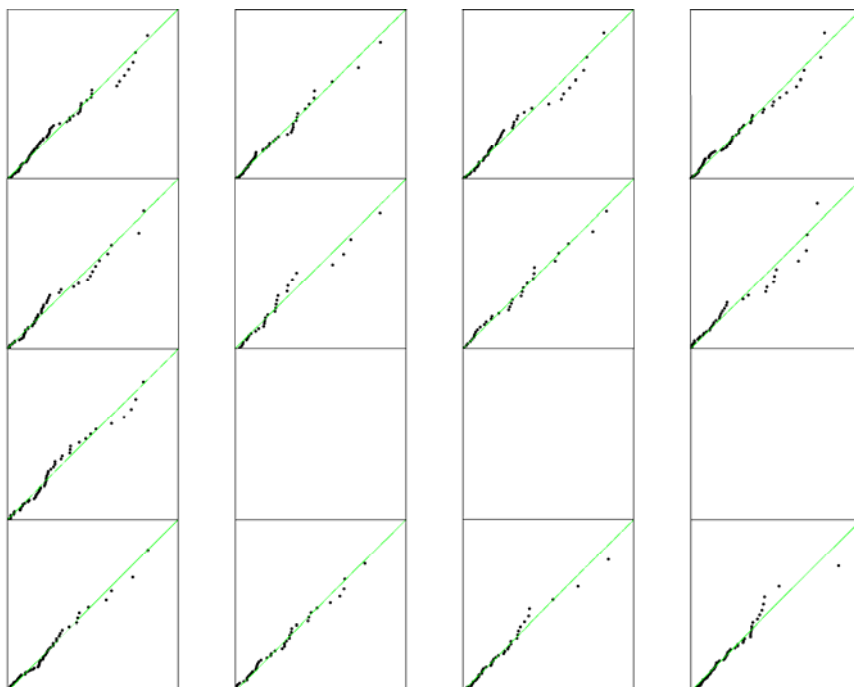


Figura 6.46 Diagnóstico gráfico mediante *PP plot* de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias en la SOM de Coruña

Como se puede ver, en todas las celdas el ajuste es satisfactorio, siendo mejor en aquellas celdas con mayor tasa de ocurrencia de eventos.

6.5.3.3 Cádiz

Por último, se ha seguido el mismo procedimiento en Cádiz. La Figura 6.47 muestra la SOM con las excedencias medias de oleaje.

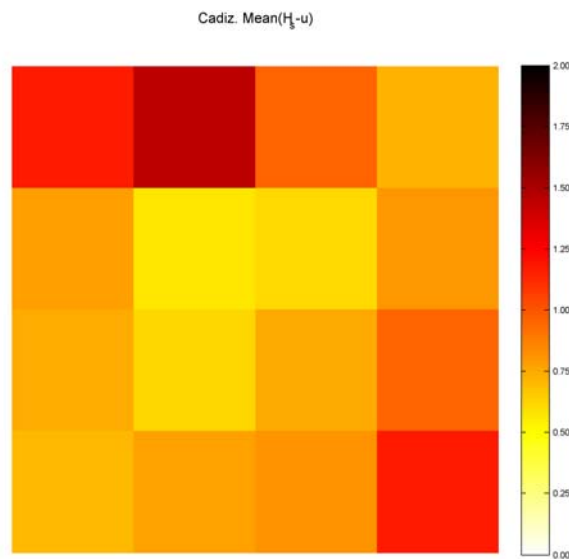


Figura 6.47 SOM de las excedencias medias sobre el umbral de oleaje de Cádiz

En cada celda de la SOM se ha ajustado un modelo de Pareto a la población de excedencias sobre el umbral. En la Figura 6.48 se muestran los histogramas adimensionalizados de las excedencias de cada celda de la SOM y la función de densidad del mejor modelo ajustado de Pareto.

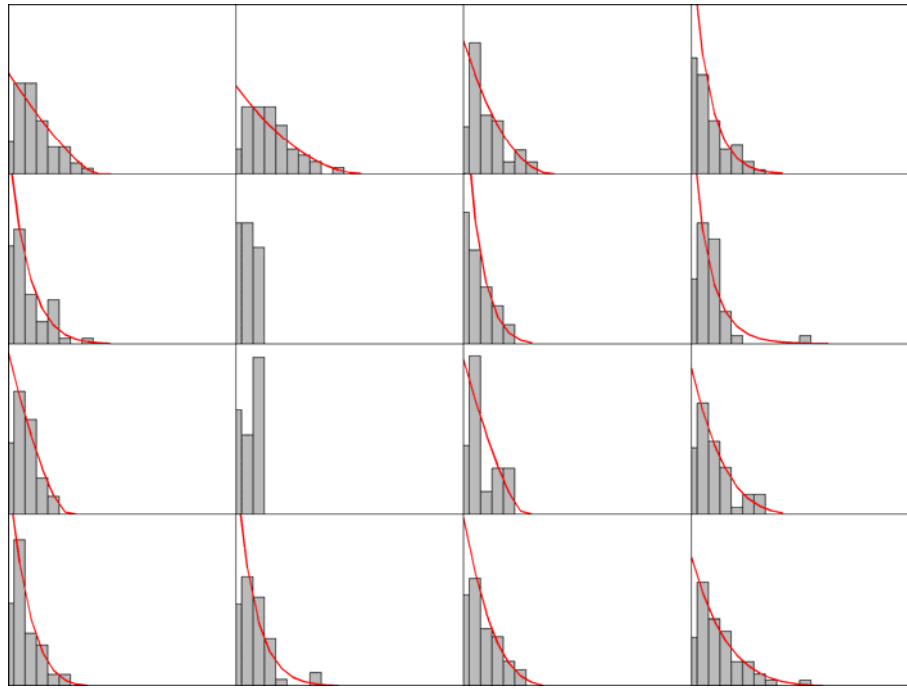


Figura 6.48 Histogramas y funciones de densidad de Pareto para cada población de excedencias de la SOM de Cádiz

Se puede ver que en todas las celdas en las que se ha rechazado el modelo de Pareto, por no ser bueno el ajuste, la población de datos no tenía el comportamiento que describe esta función de distribución.

6.5.4 Régimen extremal anual de oleaje

Una vez modeladas las excedencias de cada familia de oleajes extremos es posible calcular el régimen extremal anual (distribución estadística del máximo anual) del punto de estudio. La función de distribución total de oleaje en el punto de estudio se calculará mediante la agregación de las funciones de cada celda de la SOM:

$$F_{total}(y) = \sum_{i=1}^N F_i(y) \cdot p_i \quad (6.3)$$

donde $F_i(y)$ es la función de distribución de Pareto de cada celda de la SOM, p_i es la probabilidad de ocurrencia de cada centroide y N es el número total de celdas de la SOM. Las bandas de confianza al 95 % se obtendrán mediante el método Delta (Coles, 2001).

Por otro lado, mediante la probabilidad de ocurrencia estacional y mensual de la SOM es posible obtener los regímenes extremales de oleaje para cada estación y cada mes a partir de la expresión:

$$R = \frac{1}{v_{estacion}} \left(\frac{1}{1 - F_{total}(y)} \right) \quad (6.4)$$

siendo la v correspondiente a la estación o el mes de estudio.

6.5.4.1 Punto Norte

En la Figura 6.49 se muestra el régimen extremal de oleaje en el Punto Norte. Hay que destacar la proximidad de las bandas de confianza al régimen, lo que muestra una incertidumbre baja, pese a haber obtenido el régimen con el ajuste de 28 parámetros (14 celdas \times 2 parámetros).

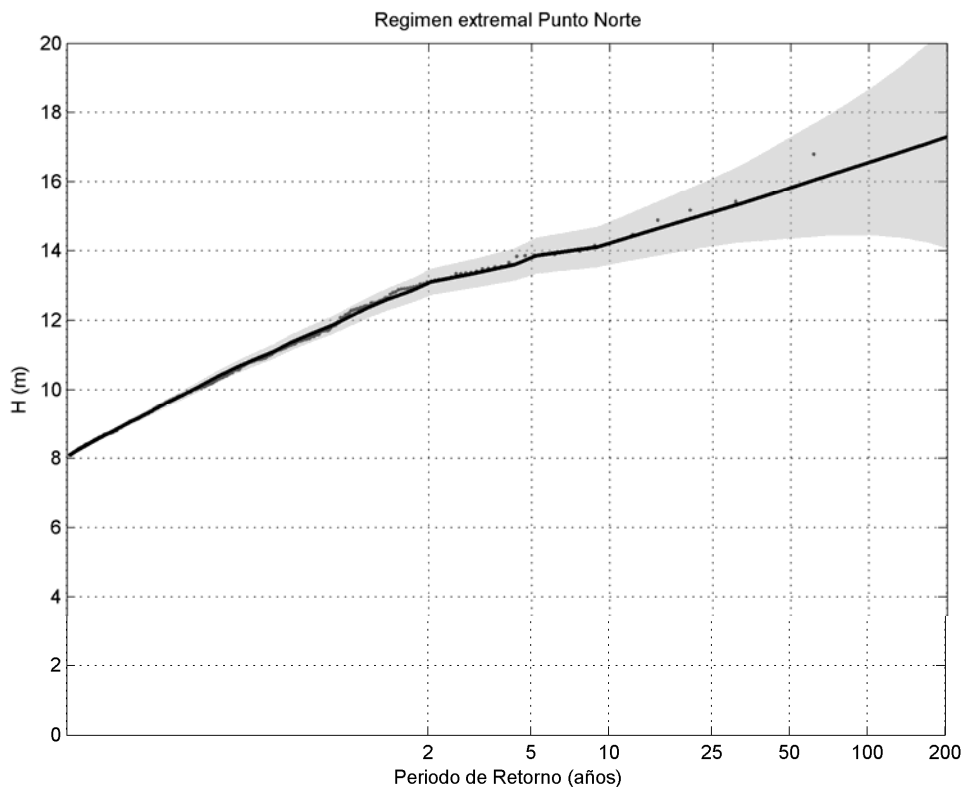


Figura 6.49 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Punto Norte

6.5.4.2 Coruña

El régimen extremal obtenido para el punto de Coruña se muestra en la Figura 6.50. Se puede ver que el régimen se ajusta perfectamente a los eventos extremos y presenta unas bandas de confianza estrechas. En este caso se puede observar un régimen menos severo que el anterior, con valores de altura de ola que no alcanzan los 14 m para un período de retorno de 200 años.

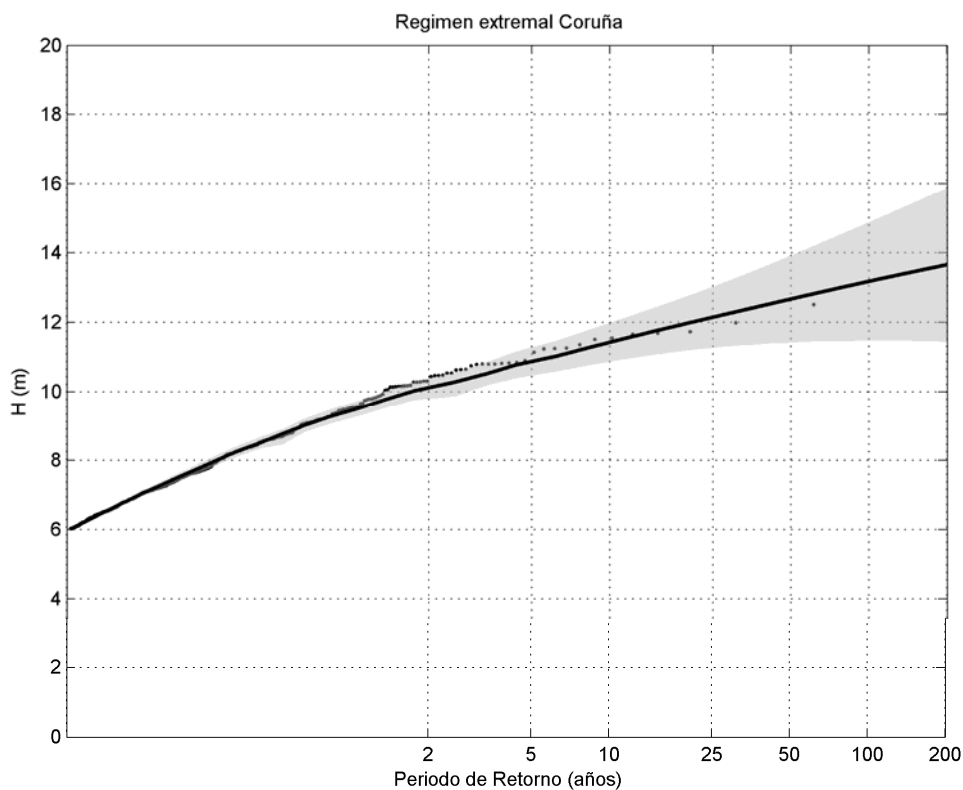


Figura 6.50 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Coruña

6.5.4.3 Cádiz

En la Figura 6.51 se muestra el régimen extremal de oleaje en Cádiz. Nuevamente se puede ver un régimen extremal ajustado a los extremos de oleaje con los que se ha modelado y unas bandas de confianza próximas al régimen. Este punto cuenta con el clima marítimo extremal más suave de los tres estudiados, que se refleja en su régimen extremal (7.6 m de altura de ola para 200 años de período de retorno).

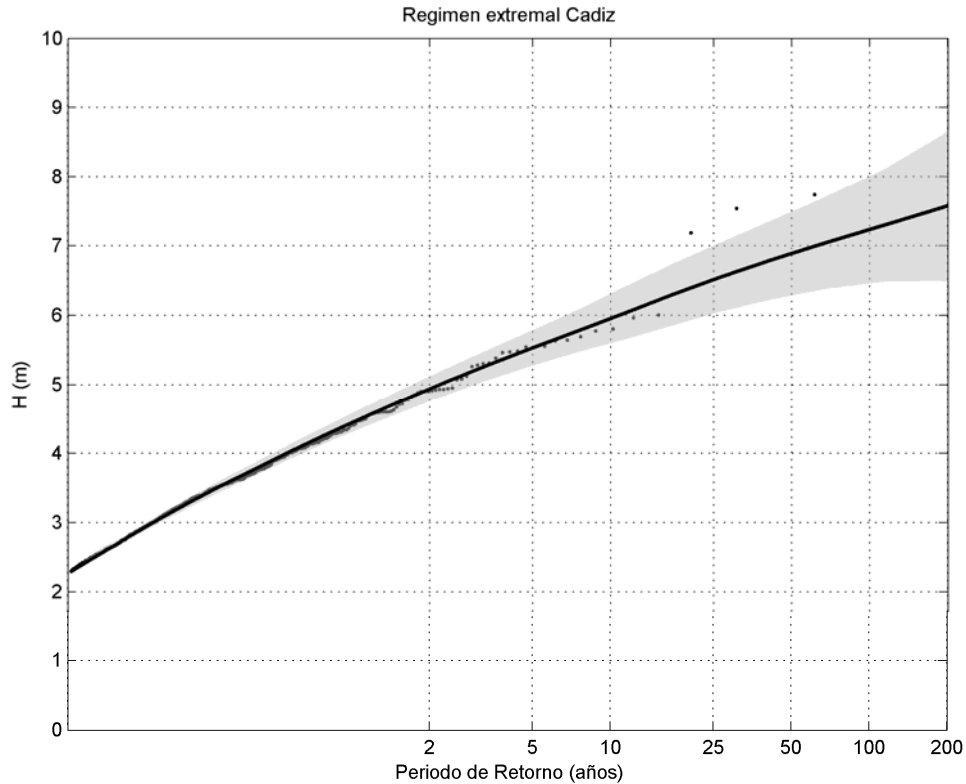


Figura 6.51 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Cádiz

6.6 Predicción a muy largo plazo: Régimen extremal de oleaje basado en el método POT

El estudio del muy largo plazo del clima marítimo extremal se puede abordar a partir de las tendencias de datos históricos o mediante proyecciones de cambio climático. En los capítulos 4 y 5 de esta tesis ya se ha planteado una metodología y estudiado las tendencias de largo plazo del régimen extremal de oleaje. El objetivo en este caso es proporcionar una metodología, basada en un *downscaling* estadístico, que permita proyectar el régimen extremal de oleaje a distintos escenarios de cambio climático.

La metodología planteada está basada en la SOM de patrones de tiempo de la zona de estudio obtenida a partir de todas las situaciones atmosféricas (SOM de 10×10), combinado con un modelo de extremos basado en el método POT. En la Figura 6.52 se muestra un esquema de la metodología:

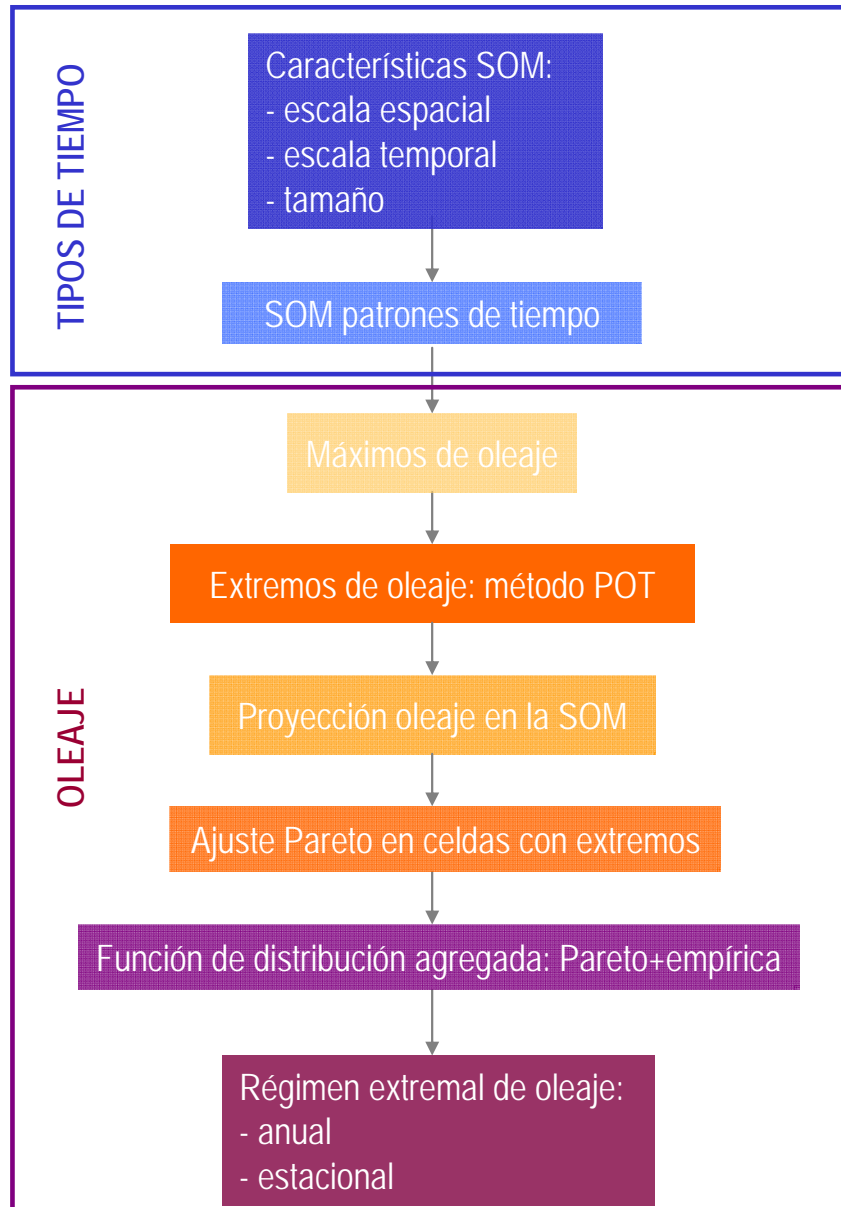


Figura 6.52 Metodología de predicción del régimen extremo de oleaje a muy largo plazo

A continuación se enumeran los pasos a seguir en el cálculo del régimen extremo:

- Determinación de la zona de influencia del punto de estudio (escala espacial), independencia entre temporales (escala temporal, en el caso del Atlántico Norte 3 días) y tamaño de la SOM.
- Obtención de patrones de tiempo del área de influencia (SOM 10×10).
- Determinación de los máximos de oleaje 3-diaros asociados a los campos de presión medios 3-diaros.
- Obtención de valores extremos de oleaje determinados a partir del método de excedencias sobre un umbral.

- Proyección de los máximos 3-diarios de oleaje e identificación de los eventos extremos en cada celda de la SOM.
- Ajuste de un modelo de Pareto en aquellas celdas con un número mínimo de excedencias (20) y cálculo de la función de distribución empírica en aquellas celdas con pocos datos.
- Cálculo de la función de distribución agregada a partir de los modelos de Pareto, la probabilidad empírica y la probabilidad de ocurrencia del extremo.
- Cálculo del régimen extremal anual a partir de la función de distribución agregada y la tasa de eventos extremos.

El punto inicial de la metodología son los patrones de tiempo del área de influencia del punto de estudio. En este caso, los tres puntos de estudio comparten la climatología sinóptica determinada por la SOM de 10×10 de los tipos de tiempo del Atlántico (Figura 6.4).

El siguiente paso es volcar los máximos 3-diarios de oleaje sobre la rejilla de la SOM, lo cual determinará una población de alturas de ola por cada celda de la SOM. Puesto que el objetivo es obtener el régimen extremal del punto, solo interesará considerar para su cálculo los oleajes extremos. Para ello, se utiliza el método POT, en el que, tras varias pruebas, se ha fijado el umbral en altura de ola en el percentil del 90 % para los tres puntos de estudio (Figura 6.25).

6.6.1 Régimen extremal para las situaciones sinópticas generadoras de extremos de oleaje

Una vez obtenidos los valores extremos de oleaje se identificarán en las celdas de la SOM. En aquellas en las que haya un número superior a 20 eventos (número mínimo de datos elegido para poder modelar) se ajustará un modelo de Pareto (6.2) mediante el que solo se modelará la intensidad de los extremos. El número mínimo de excedencias por celda permite identificar aquellas familias de oleaje extremo generadas por un determinado tipo de tiempo. Por el contrario, habrá otros patrones de tiempo que no den lugar a oleajes extremos, pero que a lo largo de la historia hayan podido generar alguna excedencia, por lo que se tendrá en cuenta para la obtención del régimen extremal del punto.

$$F(y; \sigma, \xi) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\sigma}\right)^{-1/\xi} & \text{si } \xi \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{y}{\sigma}\right) & \text{si } \xi = 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

donde σ y ξ son los parámetros de la distribución de Pareto.

A continuación se muestran los ajustes hechos para las celdas de la SOM en los tres puntos de estudio. En todos los casos se ha obtenido el diagnóstico gráfico de los modelos ajustados pero sólo se van a mostrar los correspondientes a Coruña.

6.6.1.1 Punto Norte

En la Figura 6.53 se muestran, para el Punto Norte, los histograma adimensionalizados (área=1) de las celdas en las que hay eventos extremos de oleaje. En aquellas celdas en las que el número de excedencias ha sido superior a 20 (valor mínimo de la población de datos escogido para modelar estadísticamente) y el modelado de la función ha sido satisfactorio se muestra la función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral mediante una curva roja. Las celdas en las que se ha modelado la intensidad de las excedencias permiten identificar los patrones de tiempo que generan extremos en el Punto Norte. Por lo tanto, se podría hablar de distintas familias de oleajes extremos producidas por diferentes situaciones sinópticas.

En este punto el valor del umbral es de 8.1 m y se han seleccionado 742 eventos. Hay que tener en cuenta que solo se han modelado las excedencias en aquellas celdas que contaban con más de 20 datos (conjunto de celdas recuadradas en azul) y además se han rechazado los modelos que no han obtenido un buen ajuste (celdas sombreadas en azul claro). En las celdas en las que sí ha habido excedencias, pero no había suficiente número de datos, y en las que se ha rechazado el modelo estadístico se ha tenido en cuenta la probabilidad empírica.

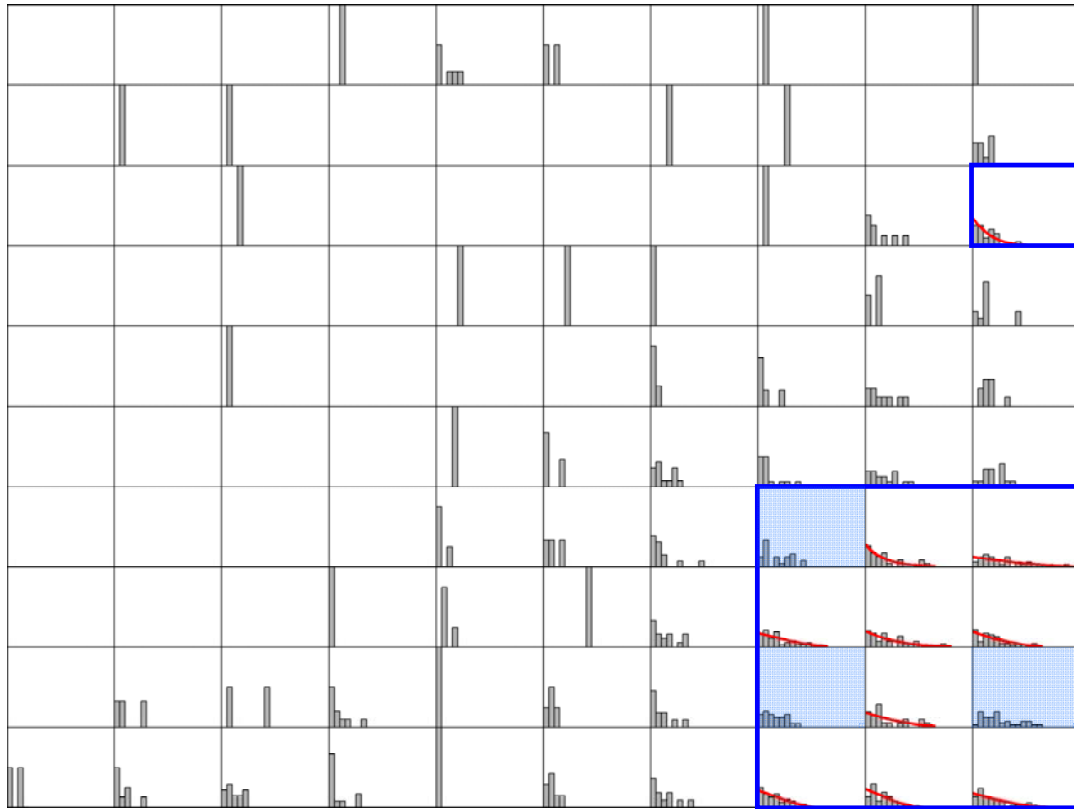


Figura 6.53 Histograma y función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral en aquellas celdas en las que se ha hecho el ajuste. Punto Norte

Las celdas con mayor número de excedencias sobre el umbral de oleaje corresponden a variantes de la situación sinóptica caracterizada por borrasca al sur de Islandia y anticiclón en las Azores (situación NAO), que generan oleajes del oeste-noroeste y afectan directamente al punto de estudio. Se puede ver que hay tres celdas en las que, a pesar de haber datos suficientes, la población no sigue un comportamiento de Pareto, por lo que el ajuste del modelo no ha sido bueno. En estos tres casos se tendrá en cuenta la probabilidad empírica de cada altura de ola.

6.6.1.2 Coruña

En la Figura 6.54 se muestran los histogramas adimensionalizados de las excedencias de altura de ola y la función de densidad de Pareto en las celdas ajustadas en Coruña. En este punto el umbral se ha situado en 6.02 m y se han utilizado 736 eventos.



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

En este caso, las celdas con mayor número de eventos extremos se corresponden con situaciones sinópticas caracterizadas por una borrasca al oeste de las Islas Británicas y un anticiclón próximo a las Islas Canarias (cambian ligeramente sus posiciones meridionales).

Los diagnósticos gráficos que permiten observar la calidad del ajuste de los modelos se muestran en las Figuras 6.55 (QQ-plot) y 6.56 (PP-plot).

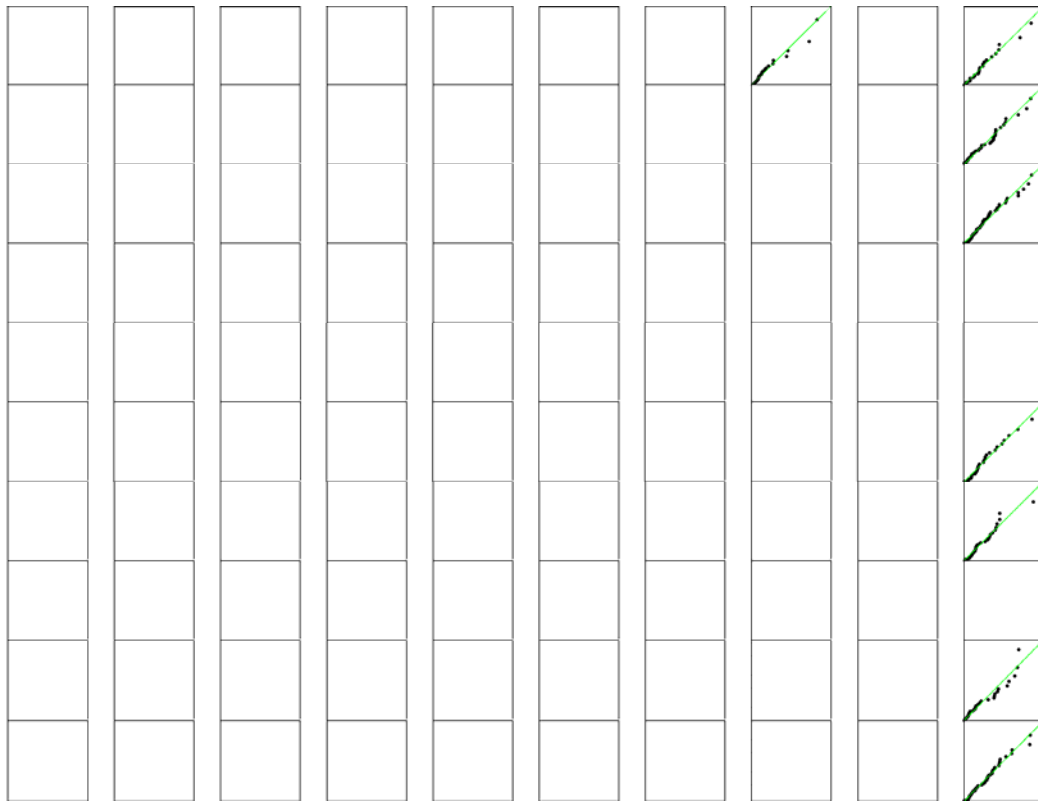


Figura 6.55 Diagnóstico gráfico mediante *QQ plot* de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias. Coruña

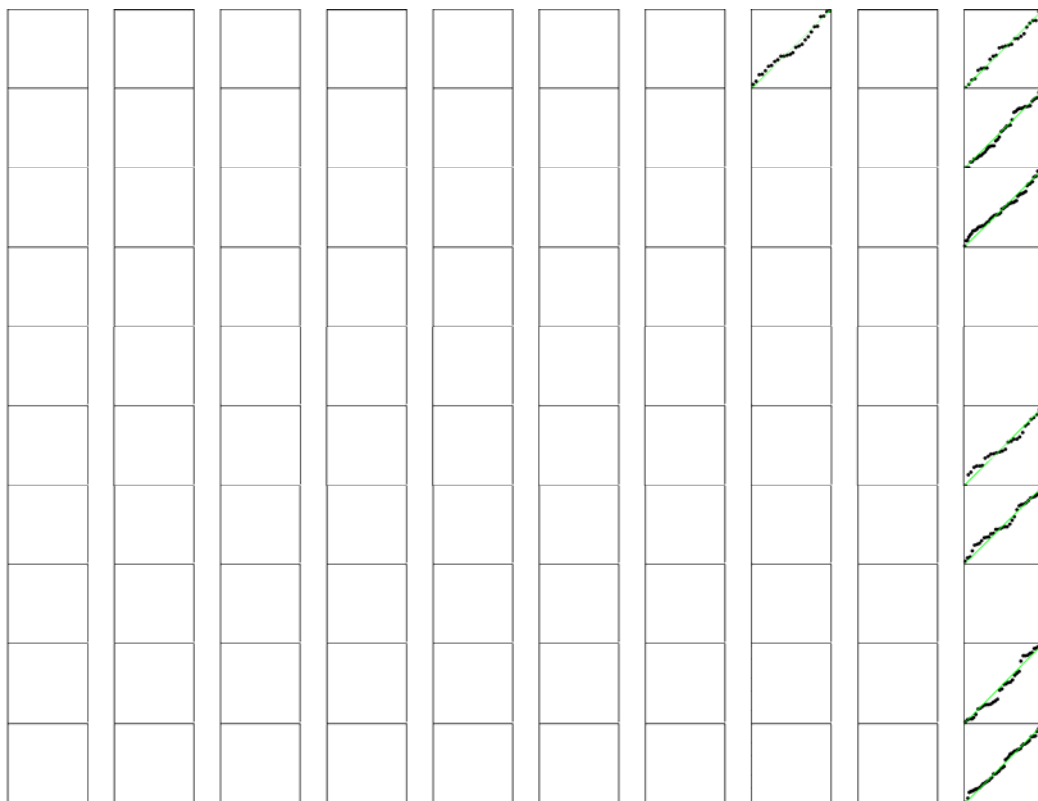


Figura 6.56 Diagnóstico gráfico mediante *PP plot* de los modelos de Pareto ajustados a cada población de excedencias. Coruña

En todas las celdas se puede ver un buen ajuste de los datos, lo que da fiabilidad a los modelos obtenidos.

6.6.1.3 Cádiz

Por último, para el punto de Cádiz (umbral situado en 2.3 m y 740 excedencias) se muestra en la Figura 6.57 los histogramas y la función de densidad de Pareto para aquellas familias de oleaje que contribuyen al régimen extremal total.

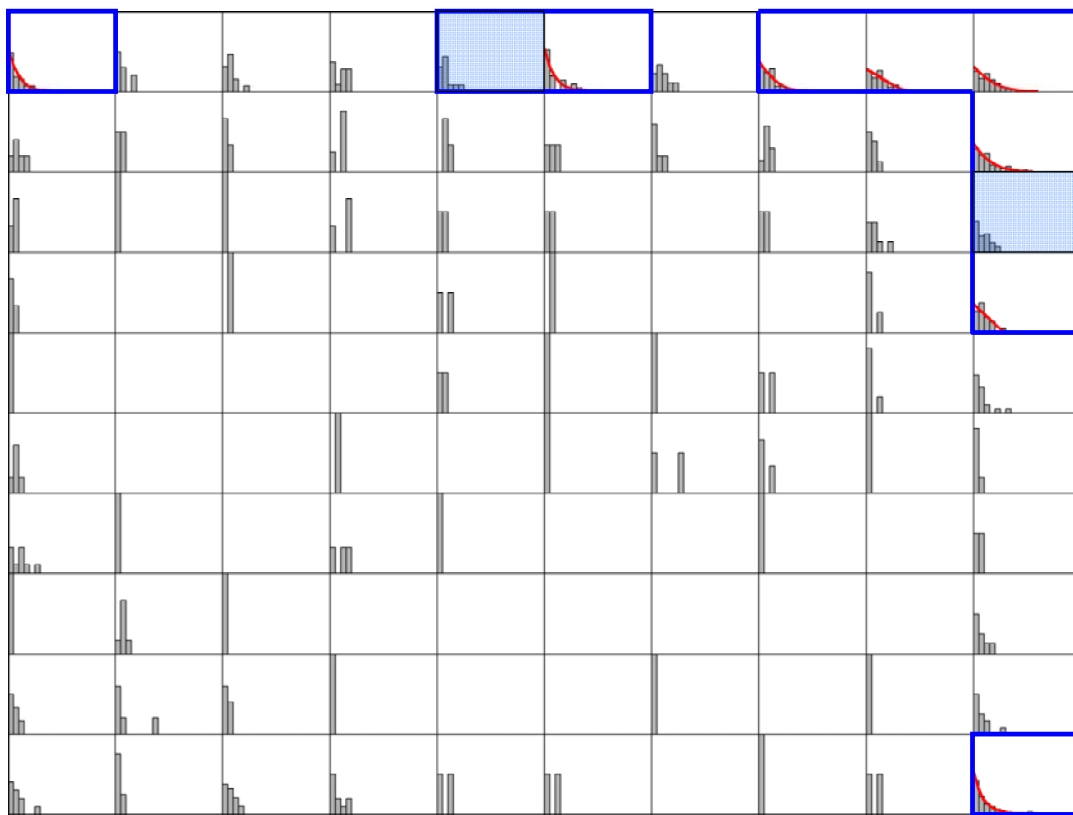


Figura 6.57 Histograma y función de densidad de Pareto de las excedencias sobre el umbral en aquellas celdas en las que se ha hecho el ajuste. Cádiz

6.6.2 Régimen extremal anual de oleaje

Una vez conocidos los regímenes extremales de las “familias” de oleaje que contribuyen al clima marítimo más severo del punto de estudio, la metodología permite inferir en el régimen extremal total del punto a partir de la agregación de los diferentes regímenes extremales y de la probabilidad empírica de aquellas excedencias que no se han

modelado. Para ello se ha calculado la función de distribución agregada, a partir de las funciones de distribución de cada celda seleccionada de la SOM afectándolas de la probabilidad de que para ese patrón de tiempo se produzca un evento extremo.

$$F_{total}(y) = \sum_{i=1}^N F_i(y) q_i \quad (6.6)$$

donde $F_i(y)$ es la función de distribución de Pareto de las celda de la SOM donde ha habido excedencias, q_i es la probabilidad de que ocurra un evento extremo en esa celda y N es el número de celdas en las que ha habido eventos extremos.

Para obtener el régimen extremal total a escala anual hay que reescalar la función de distribución obtenida mediante la tasa de ocurrencia anual de eventos (ν). Haciendo uso de la relación entre período de retorno y probabilidad de ocurrencia se obtiene la expresión:

$$R = \frac{1}{\nu} \left(\frac{1}{1 - F_{total}(y)} \right) \quad (6.7)$$

donde R es el período de retorno en años, $F_{total}(y)$ es la función de distribución de Pareto en el punto de estudio y ν es la tasa de ocurrencia anual de eventos extremos.

Esta metodología, basada en patrones de tiempo clasificados mediante SOM, permite estudiar la variabilidad del clima marítimo extremal en un punto a distintas escalas, gracias a la información temporal contenida en la SOM. Mediante las probabilidades de ocurrencia estacional y mensual se pueden determinar los regímenes extremales de oleaje de cada estación o cada mes. Por otro lado, gracias a esta información esta metodología permite proyectar el régimen extremal en un punto a distintos escenarios de cambio climático, pudiendo cuantificar las variaciones en los cuantiles de altura de ola asociados a distintos períodos de retorno.

Aplicando la metodología en cada punto de estudio se obtiene el régimen extremal de oleaje.

6.6.2.1 Punto Norte

En la Figura 6.58 se muestra el régimen extremal de oleaje del Punto Norte junto con las excedencias sobre el umbral. Se puede ver como el régimen extremal se ajusta perfectamente a los puntos, mostrando un clima marítimo severo, con alturas de ola de 15 m para 25 años de período de retorno.

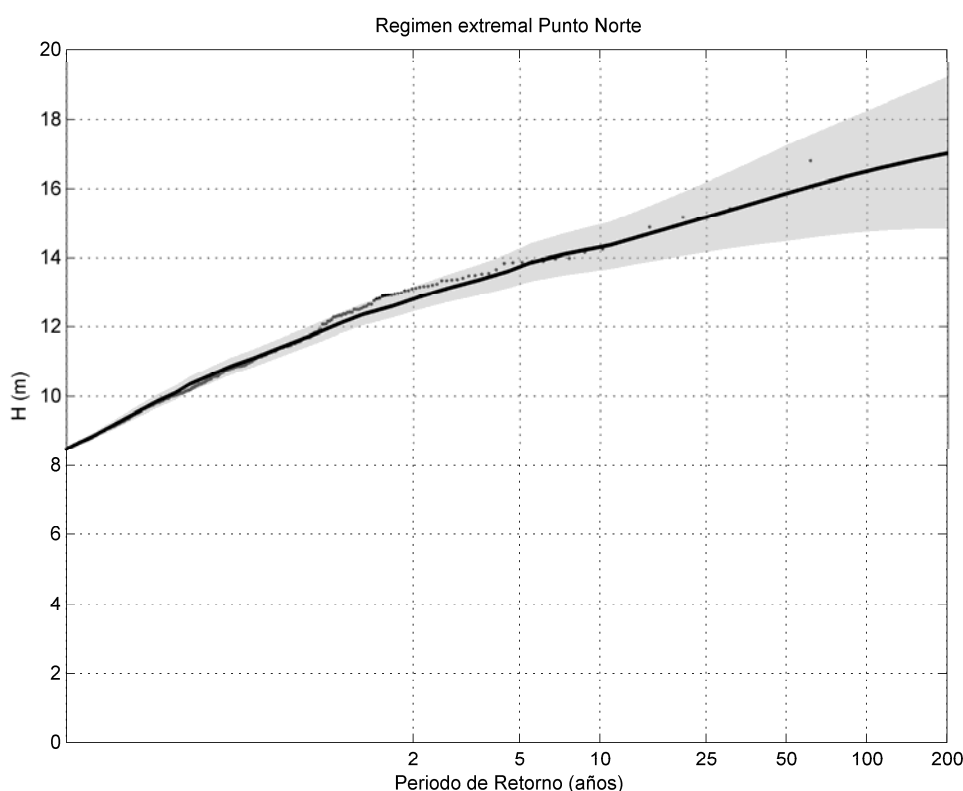


Figura 6.58 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Punto Norte

Es importante señalar que las distintas curvaturas que presentan los eventos extremos representados en el papel probabilístico son reproducidas por el modelo de extremos de forma acertada. Estas “curvaturas” están asociadas a las distintas familias de oleaje extremal que, como se ha visto anteriormente, se han ajustado adecuadamente.

6.6.2.2 Coruña

La Figura 6.59 muestra el régimen extremal de oleaje en Coruña. Se puede ver como el régimen se ajusta a los puntos y cambia de curvatura, provocado por las diferentes

familias de oleaje que contribuyen al régimen extremal en la zona. En este punto la multimodalidad de los estados de mar es acusada, siendo los oleajes del noroeste y suroeste los más importantes. El aumento de los intervalos de confianza a partir de R=50 años es debido a las deficiencias en los ajustes locales a la distribución de Pareto. Este aspecto, lógicamente, es fundamental y debe tenerse en cuenta ya que un mal ajuste local repercute de forma notable en el resultado global.

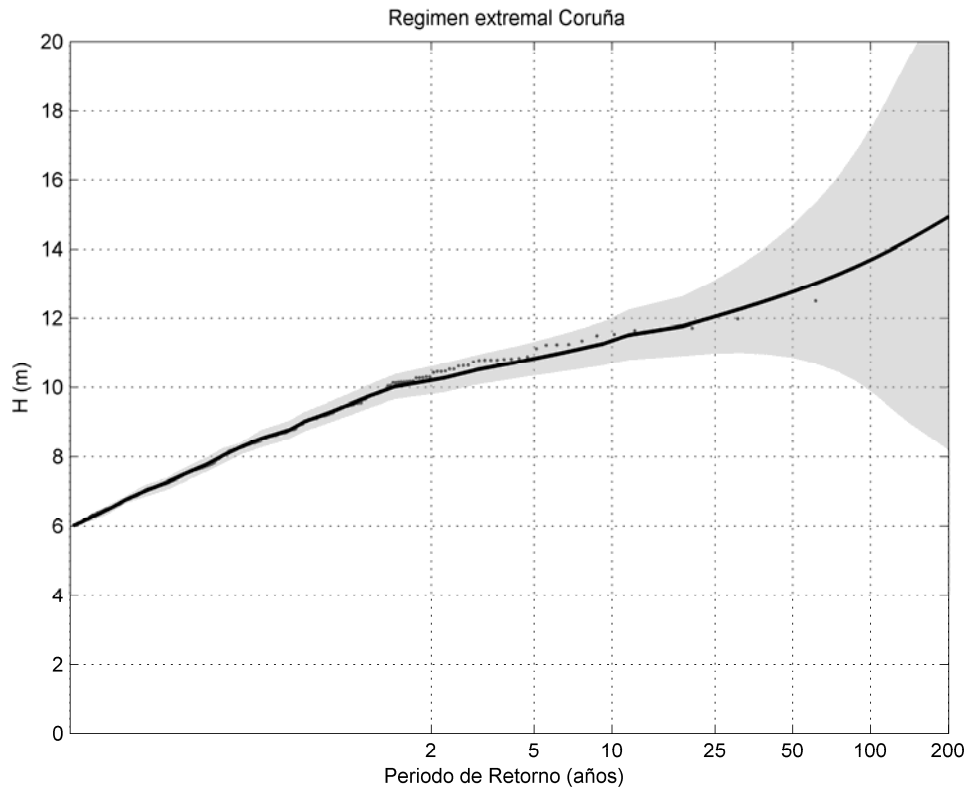


Figura 6.59 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Coruña

Esta metodología también permite estudiar la escala temporal estacional a partir de las probabilidades de ocurrencia estacionales de la SOM. A modo de ejemplo se han construido los regímenes extremales para invierno (DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON) en el punto de Coruña (Figura 6.60).

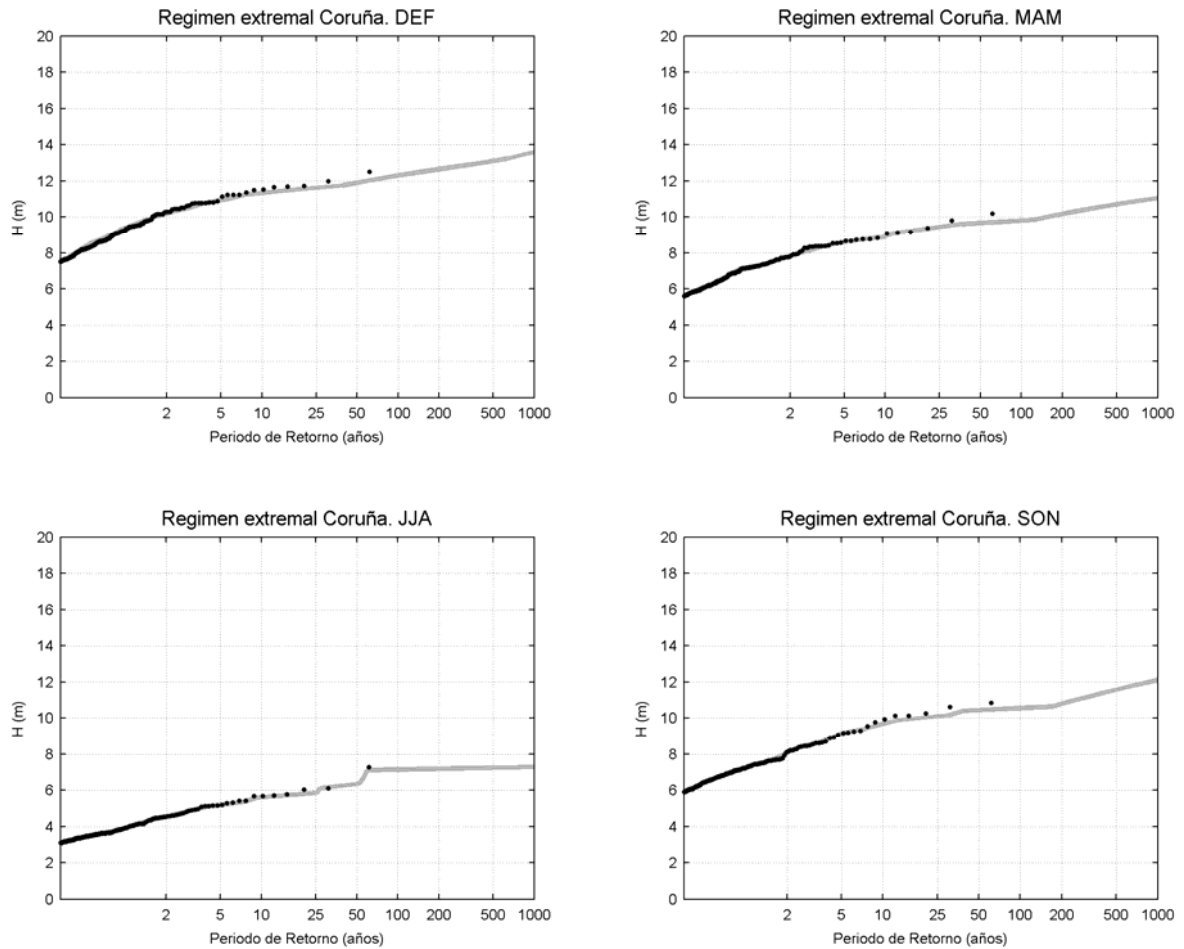


Figura 6.60 Regímenes extremales estacionales de oleaje. Coruña

Los regímenes extremales más severos son el de invierno y otoño, con alturas de ola de 12 m y 10 m, respectivamente, para 50 años de período de retorno. El régimen extremal más suave se produce en verano, donde la altura de ola de 50 años es 6 m. La discontinuidad observada en el régimen es debida a la falta de datos para hacer el ajuste en esta estación. Al volcar sobre la SOM los eventos extremos ocurridos en verano ha habido muy pocas celdas con un número suficiente de datos para realizar el ajuste del modelo de Pareto, por lo que el régimen extremal de verano se ha construido principalmente con la probabilidad empírica de los extremos.

6.6.2.3 Cádiz

En la Figura 6.61 se muestra el régimen extremal obtenido para el punto de Cádiz. El régimen obtenido se ajusta perfectamente a los eventos extremos de la zona.

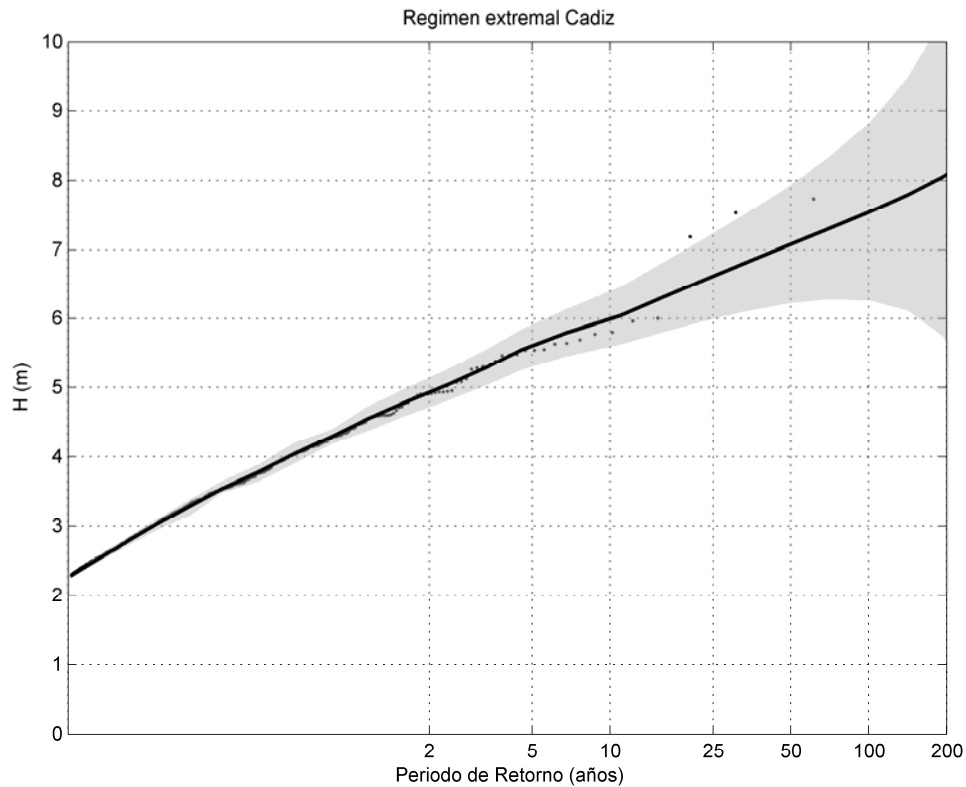


Figura 6.61 Régimen extremal de oleaje (línea gris) y excedencias sobre el umbral (puntos negros) y bandas de confianza al 95 % (sombreado gris). Cádiz

6.7 Proyecciones de clima marítimo extremal

Una vez planteada la metodología para determinar el régimen extremal en un punto determinado, a partir de los campos de presiones a nivel del mar, se presenta la aplicación para obtener las proyecciones de clima marítimo extremal bajo distintos escenarios de cambio climático.

Dado que el tiempo considerado como representativo de una climatología es de 30 años se han escogido los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 para obtener y comparar las proyecciones de régimen extremal a distintos escenarios. Para poder comparar estas proyecciones con los datos históricos se ha tomado el período 1960-1990 como período de control y representativo del siglo XX.

En primer lugar, se presentan y discuten los modelos y escenarios elegidos y, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada punto de estudio.

6.7.1 Escenarios de cambio climático y modelos globales

6.7.1.1 Escenarios

En el Capítulo 2 de esta tesis se han expuesto los modelos y escenarios desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. De los posibles escenarios IE-EE se han escogido tres de ellos para proyectar el clima marítimo extremal del Punto Norte, Coruña y Cádiz. Además, se utiliza también el escenario hipotético “Compromiso de Composición Constante” denominado 20C3M como muestra científica para contrastar la validez de los modelos elegidos.

Se han escogido las familias de las líneas evolutivas A1, A2 y B1 y dentro de estas familias se han escogido los escenarios A1B, A2 y B1 (escenarios indicativos de cada familia, Nakicenovic and Stewart 2000). Los escenarios A2 y B1 representan dos líneas evolutivas muy distintas. El A2 se basa en un mundo heterogéneo, con crecimiento continuo de la población y uso de combustibles fósiles y tecnologías conocidas. Sin embargo, el B1 plantea una población que alcanza su máximo a mediados de siglo y utiliza tecnologías limpias y mejor aprovechamiento de los recursos. Como situación intermedia se encuentra el escenario A1B, en el que se produce un rápido crecimiento económico utilizando de forma equilibrada las tecnologías limpias y las utilizadas hasta ahora.

Estos tres escenarios son los más utilizados por la comunidad científica para la proyección de distintas variables de estudio. Por ejemplo, el escenario A1B es utilizado en el estudio “Marine & Coastal Projections” del UK Climate Projections (2009) para determinar los futuros cambios en el clima marítimo del Reino Unido mediante un *downscaling* dinámico y el A2 es utilizado por Caires et al. (2006) para analizar las proyecciones de clima marítimo extremal a nivel mundial. Este último estudio utiliza una metodología basada en las anomalías y gradiente de presión sobre cada punto de estudio, pero no tiene en cuenta el área de generación del oleaje que afecta a cada punto de estudio ni vincula los tipos de tiempos característicos de la zona de estudio con el oleaje extremal.

6.7.1.2 Modelos globales

Los datos de presiones a nivel del mar necesarios para proyectar el clima marítimo extremal se han tomado de tres modelos globales (GCM). Entre los modelos globales de los distintos centros de investigación asociados al IPCC se han elegido el modelo ECHAM 5 perteneciente al Max-Planck-Institute für Meteorologie (Alemania), el UK-HadCM3 del Hadley Centre (Reino Unido) y el CNRM CM3 del Centre National de Recherche Météorologiques (Francia).

Estos tres modelos han sido elegidos por la disponibilidad de los datos a resolución diaria y por su fiabilidad, contrastada en Aghedo et al. (2010) para el ECHAM 5.

Utilizando el escenario 20C3M del siglo XX y los datos de reanálisis de campos de presiones de NCEP se ha comprobado la capacidad de cada modelo de reproducir las condiciones de presión históricas. Este test permitirá determinar si los tres modelos son capaces de reproducir adecuadamente los campos de presiones y, por tanto, válidos para proyectar el clima marítimo extremal.

Hay que tener en cuenta que la ejecución de los modelos en el escenario 20C3M responde a su libre evolución a partir de los *inputs* de emisiones y radiación del siglo XX, pero no se calibran a lo largo del tiempo, por lo que no se podrán comparar temporalmente las salidas de los modelos globales en el 20C3M con los registros históricos de presión. Por lo tanto, para comparar los resultados de cada modelo con los datos históricos se han empleado técnicas de clasificación. En primer lugar, utilizando el análisis por componentes principales, se han comparado los modos espaciales de los modelos climáticos en el 20C3M con los modos espaciales de los datos históricos de NCEP en el período de control.

En la Figura 6.62 se muestran los 6 primeros modos espaciales de los campos de presiones medios 3-diaros de NCEP en el área de influencia de los tres puntos de estudio (Atlántico Norte).

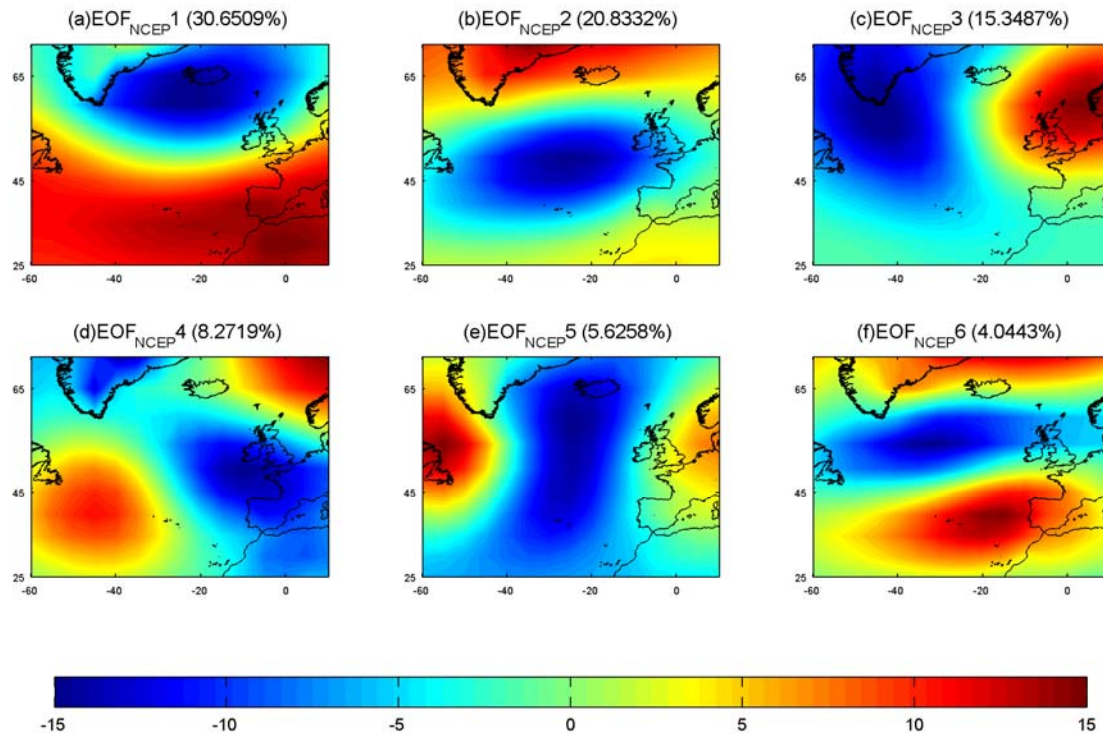


Figura 6.62 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos históricos de NCEP (1960-1990, anomalías de presión, mb)

En la Figura 6.63 se muestran los 6 primeros modos espaciales de los campos de presiones del modelo ECHAM 5. Mediante una primera inspección visual se puede ver una similitud muy grande entre los modos espaciales del modelo y los de NCEP. El análisis por componentes principales complementa el modo espacial con el temporal (el producto de ambos más la situación media reproduce los datos), por lo que en el modo espacial interesa su patrón e intensidad, no su signo, que se podrá ver corregido por el modo temporal. Por otro lado, la varianza explicada por cada uno de los modos es prácticamente la misma (por ejemplo, el primer modo: $\text{var}_{\text{EOF1}}^{\text{NCEP}} = 30.6509\%$ frente a $\text{var}_{\text{EOF1}}^{\text{ECHAM5}} = 30.6406\%$). Por lo tanto, el modelo es capaz de reproducir adecuadamente los campos de presiones a nivel del mar.

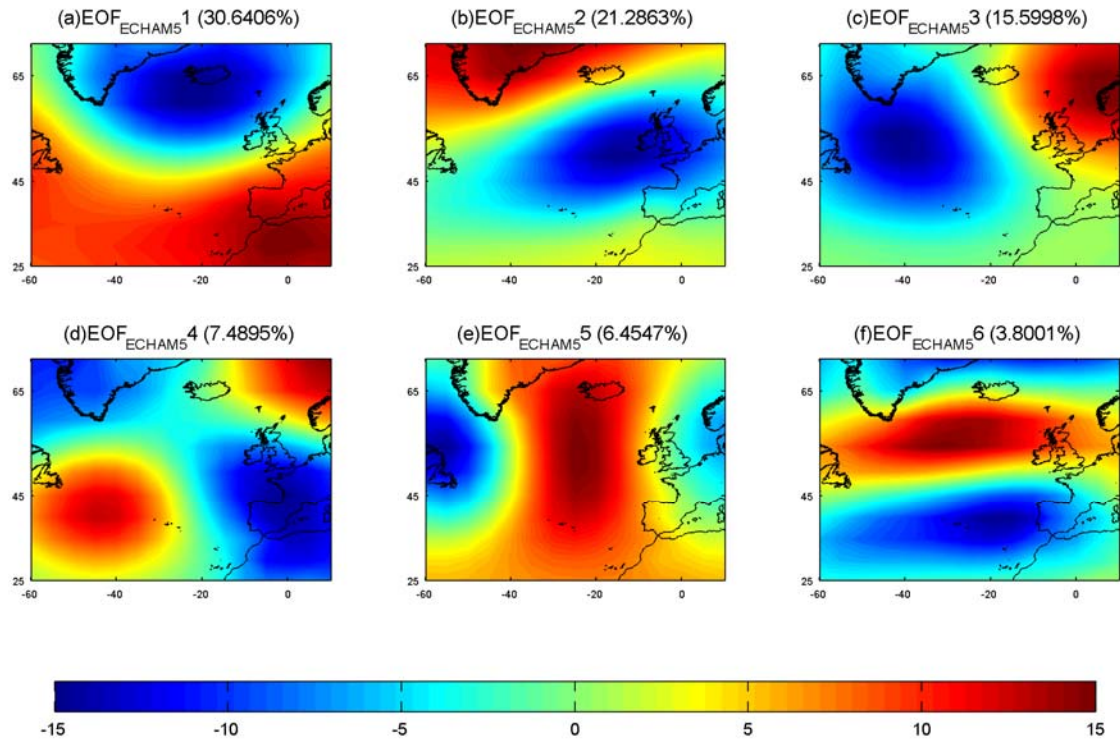


Figura 6.63 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo ECHAM 5 (1960-1990, anomalías de presión, mb)

En la Figura 6.64 se muestran los 6 primeros modos espaciales de los campos de presiones obtenidos en el escenario 20C3M del modelo CNRM CM3. En este caso las diferencias entre los modos espaciales homólogos son claras y las varianzas explicadas por cada uno de ellos son diferentes.

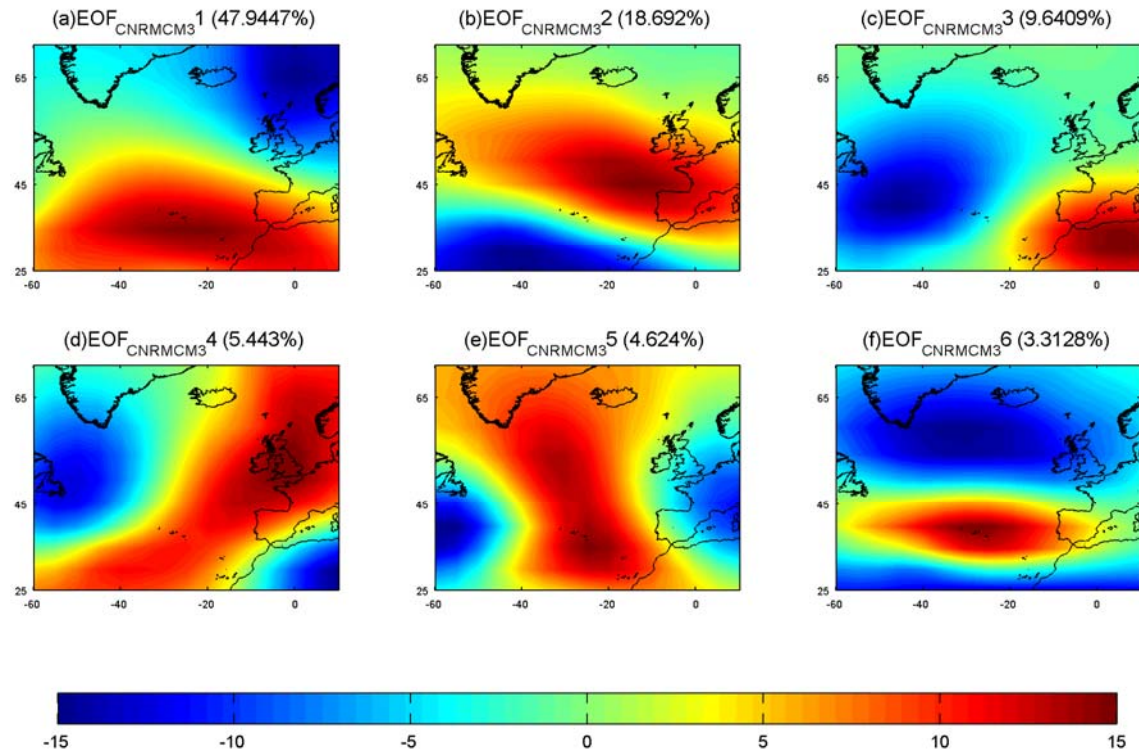


Figura 6.64 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo CNRM CM3 (1960-1990, anomalías de presión, mb)

Por último, en la Figura 6.65 se muestra el mismo gráfico para el modelo UK-HadCM3. En este caso los modos espaciales del modelo y NCEP son similares, así como la varianza explicada por la mayoría de ellos.

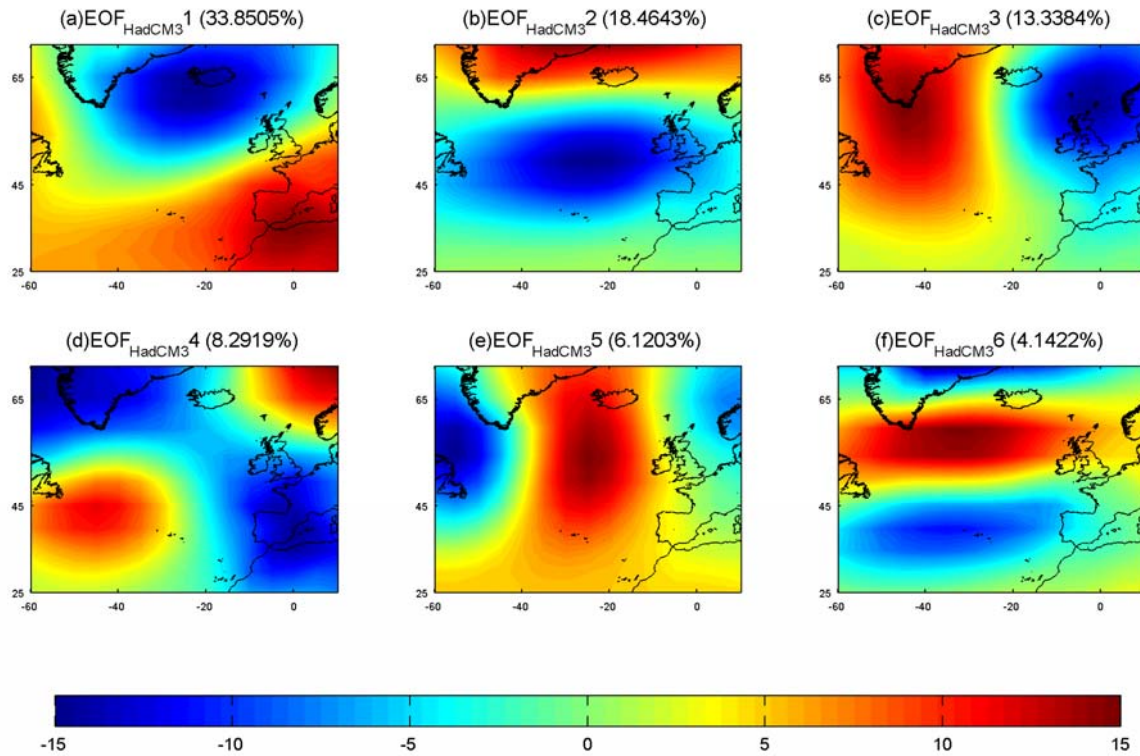


Figura 6.65 Primeros 6 modos espaciales correspondientes al análisis por componentes principales del Atlántico Norte. Datos proyectados en 20C3M modelo UK-HadCM3 (1960-1990, anomalías de presión, mb)

La metodología presentada para proyectar el régimen extremal de oleaje se basa en los patrones de tiempo obtenidos a partir de la herramienta de clasificación SOM. Esta herramienta proporciona la probabilidad de ocurrencia de cada dato clasificado en la rejilla de la SOM, por lo que será posible proyectar las presiones obtenidas por cada modelo global en el período de control del escenario 20C3M. El grado de similitud entre las probabilidades sobre la SOM de los modelos climáticos y las probabilidades de NCEP para el mismo período de tiempo permitirá establecer una nueva comprobación de la calidad de los modelos climáticos en cuanto a campos de presión a nivel del mar.

La comparación entre dos distribuciones diferentes de campos de presiones sobre la misma rejilla definidas por las probabilidades de NCEP $\{p_1, \dots, p_M\}$ y las del modelo climático $\{q_1, \dots, q_M\}$, siendo M el tamaño de la SOM, se puede analizar a través de la entropía relativa que se define como:

$$RE(P|Q) = \sum_{q_i \neq 0} p_i \log \frac{p_i}{q_i} \tag{6.8}$$

Si las dos probabilidades son iguales $p_i = q_i$ el valor de la entropía relativa es cero.

En la Figura 6.66 se muestran la SOM de presiones históricas NCEP y las SOM de presiones de los modelos climáticos, en el período 1960-1990.

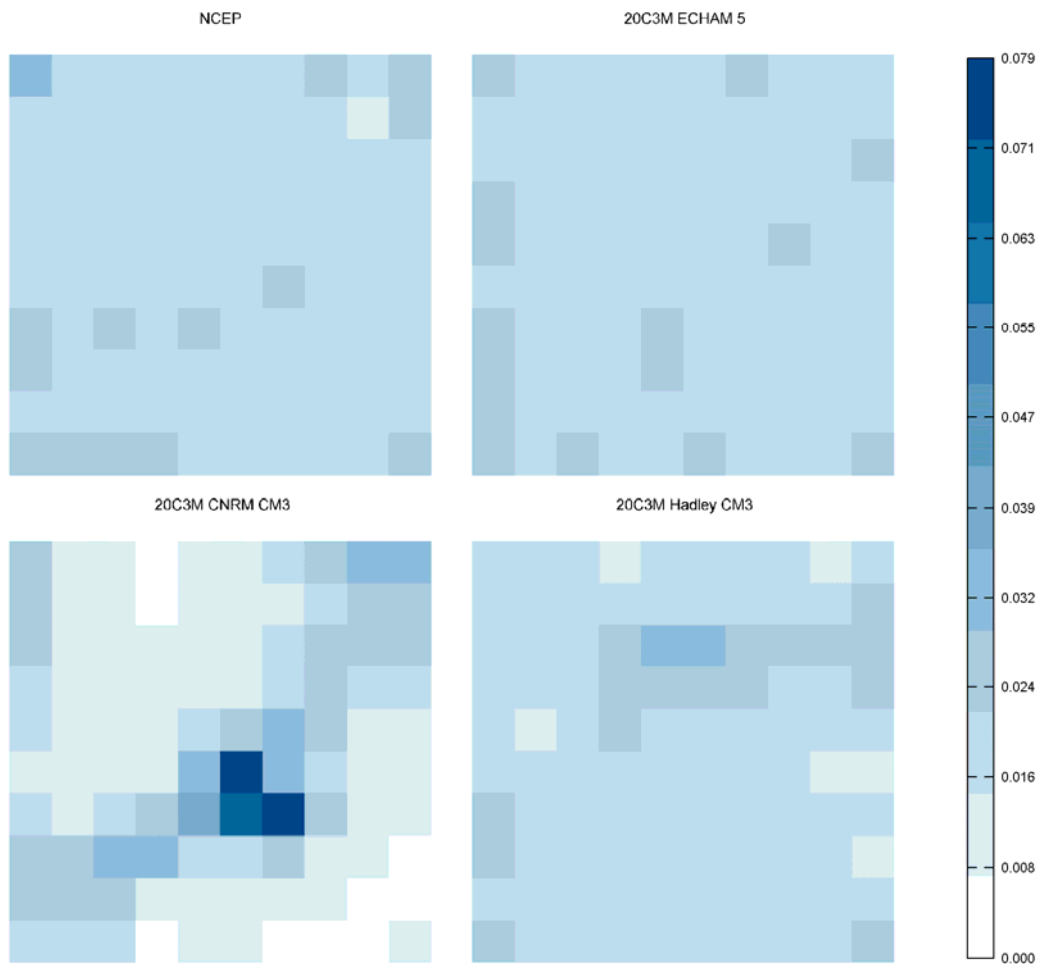


Figura 6.66 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990

La comparación cuantitativa entre la similitud entre la SOM de cada modelo climático y la de NCEP se muestra en la Tabla 6.4.

Índice Similitud	ECHAM 5	CNRM CM3	Hadley CM3
RE	0.039	0.7079	0.0862

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

Los valores de la entropía relativa revelan una clara similitud entre las SOM de las presiones obtenidas por los modelos ECHAM 5 y Hadley CM3 con la de las presiones de NCEP en el mismo período de tiempo (valores muy próximos a 0). Sin embargo, el valor elevado de la entropía relativa para el modelo CNRM CM3 muestra una diferencia grande entre la SOM de este modelo y la de NCEP.

Por último, utilizando la información de la probabilidad de ocurrencia por estaciones, se han comparado las SOM de NCEP y los modelos climáticos para cada estación, Las Figuras 6.67, 6.68, 6.69 y 6.70 muestran las SOM de presiones históricas y modelos climáticos de invierno (DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON).

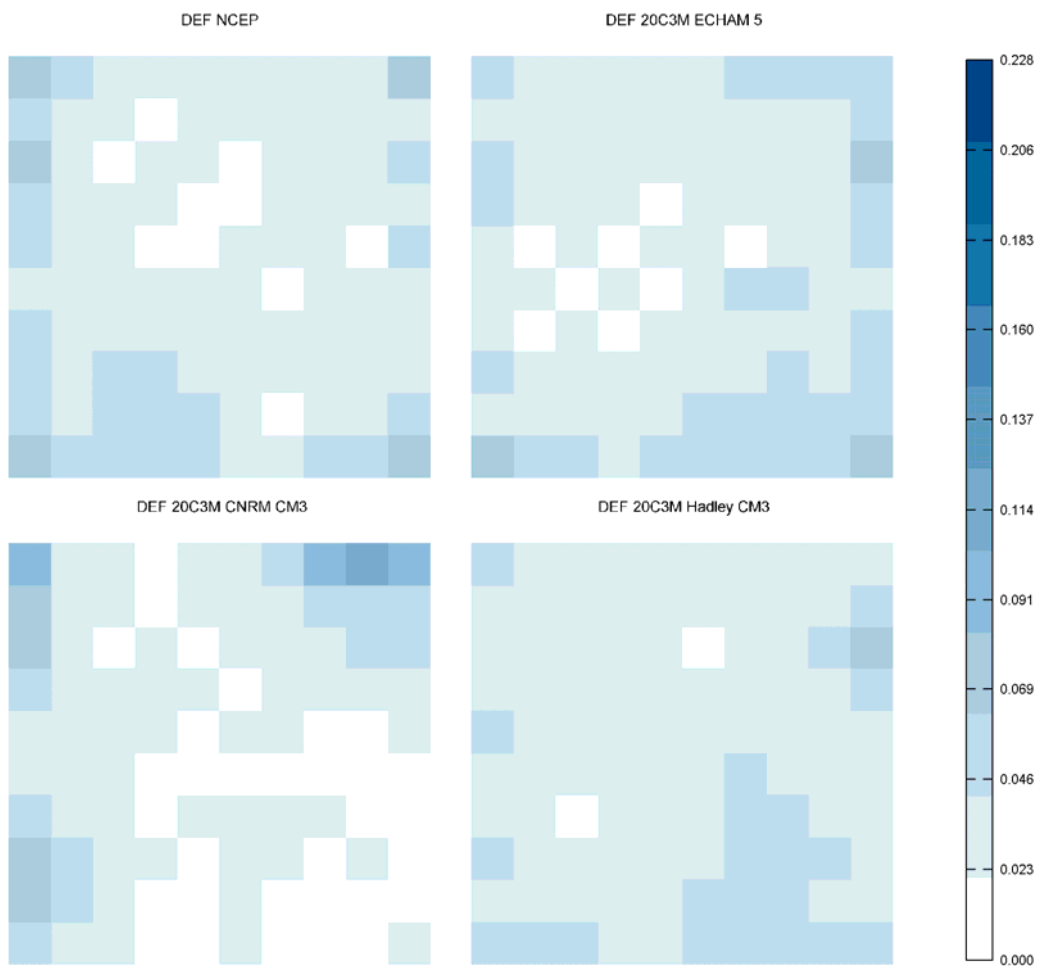


Figura 6.67 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de DEF de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990

Índice Similitud	ECHAM 5	CNRM CM3	Hadley CM3
RE	0.4849	0.7485	0.5011

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 periodo 1960-1990

A través de la entropía relativa (Tabla 6.5) se puede ver que todos los modelos tienen más dificultades para reproducir la SOM de presiones de DEF que para reproducir la SOM de presiones anual. La Tabla 6.5 muestra que el peor modelo nuevamente es el CNRM CM3.

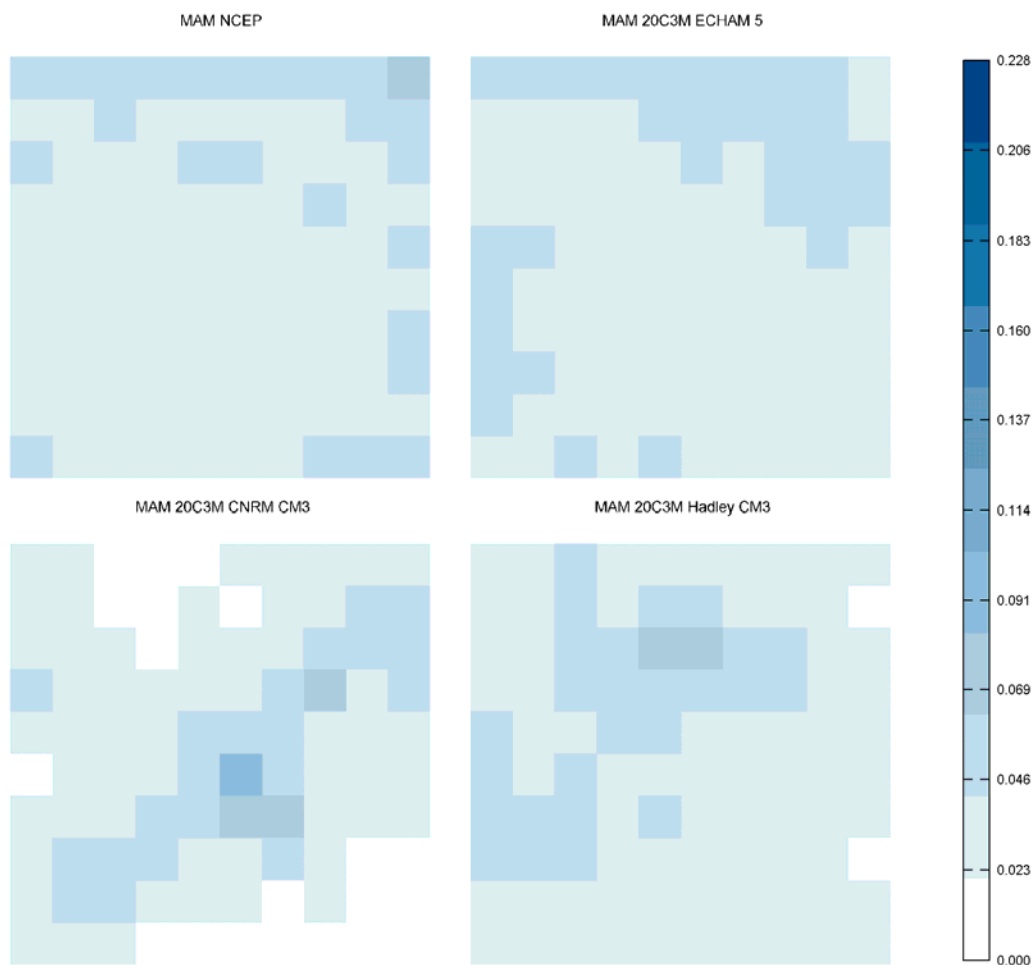


Figura 6.68 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de MAM de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el periodo 1960-1990

Índice Similitud	ECHAM 5	CNRM CM3	Hadley CM3
RE	0.2440	1.0028	0.4584

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 periodo 1960-1990

En la estación compuesta por los meses Marzo, Abril y Mayo el modelo climático que es capaz de reproducir mejor los campos de presiones históricos es el ECHAM 5. El modelo CNRM CM3 presenta una entropía relativa elevada, que muestra diferencias evidentes con la SOM de campos de presiones de NCEP en los meses de primavera del período 1960-1990.

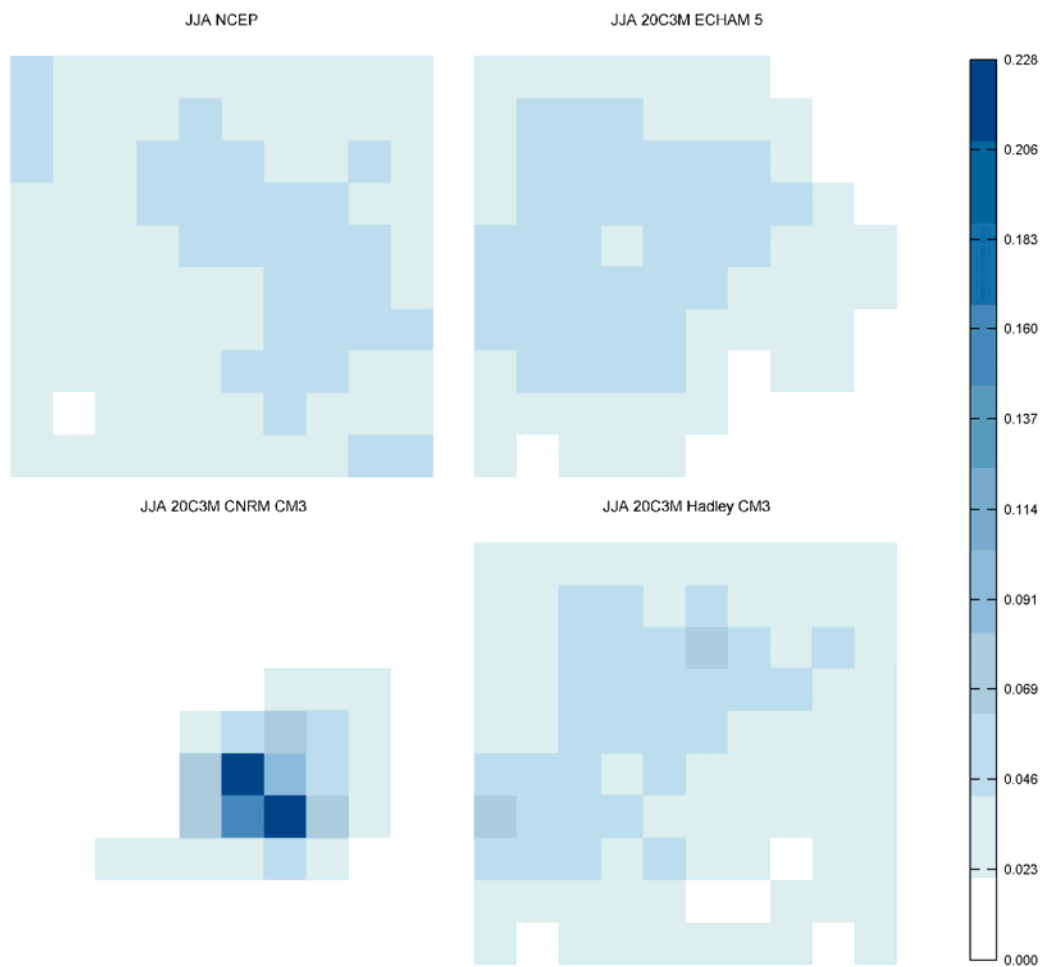


Figura 6.69 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de JJA de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990

Índice Similitud	ECHAM 5	CNRM CM3	Hadley CM3
RE	0.8977	1.9577	0.5848

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

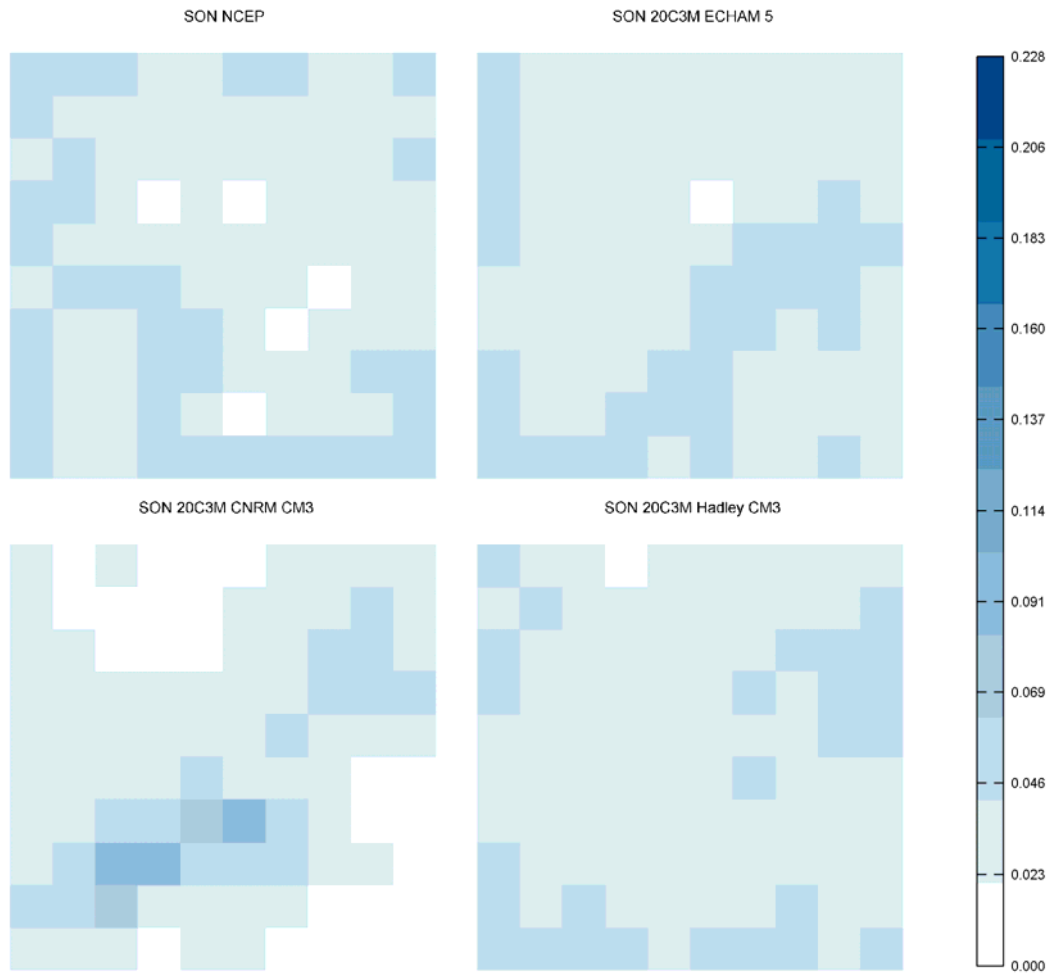


Figura 6.70 Probabilidades de ocurrencia de las proyecciones de las presiones medias 3-diaras de SON de los datos históricos de NCEP y de los modelos climáticos ECHAM 5, CNRM CM3 y UK-HadCM3 en el período 1960-1990

Índice Similitud	ECHAM 5	CNRM CM3	Hadley CM3
RE	0.3110	0.9473	0.3046

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

En las estaciones de verano (JJA) y otoño (SON) las conclusiones obtenidas a partir del estudio de la entropía son similares a las obtenidas para las estaciones de invierno y

primavera. El modelo CNRM CM3 presenta valores altos de entropía relativa en todos los casos, lo que quiere decir que hay grandes diferencias entre las SOM comparadas. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el estudio de Brands et al. (2010).

Los test aplicados para comprobar la fiabilidad de los modelos climáticos, en cuanto a campos de presiones a nivel del mar, ponen de manifiesto la incapacidad del modelo CNRM CM3 de reproducir los campos de presiones anuales y estacionales en el período de control 1960-1990 con el nivel de calidad exigible para nuestro estudio. En base a estos resultados se ha prescindido de los resultados de este modelo para obtener las proyecciones de clima marítimo extremal a escenarios de cambio climático.

La comparación entre los modelos ECHAM 5 y UK-HadCM3 con NCEP muestra resultados similares, por lo que la proyección final de clima marítimo extremal en cada punto se hará a partir de un *ensemble* medio de ambos modelos (igual peso a ambos modelos).

6.7.2 Proyecciones de clima marítimo extremal. Punto Norte

Utilizando la metodología planteada en el apartado 6.5 se ha obtenido, en primer lugar el régimen extremal de oleaje del período de control 1960-1990. Por un lado se ha calculado el régimen a partir de los datos históricos de presiones de NCEP y, por otro, a partir de los datos los modelos climáticos del escenario 20C3M. La Figura 6.71 muestra la comparación entre ambos regímenes.

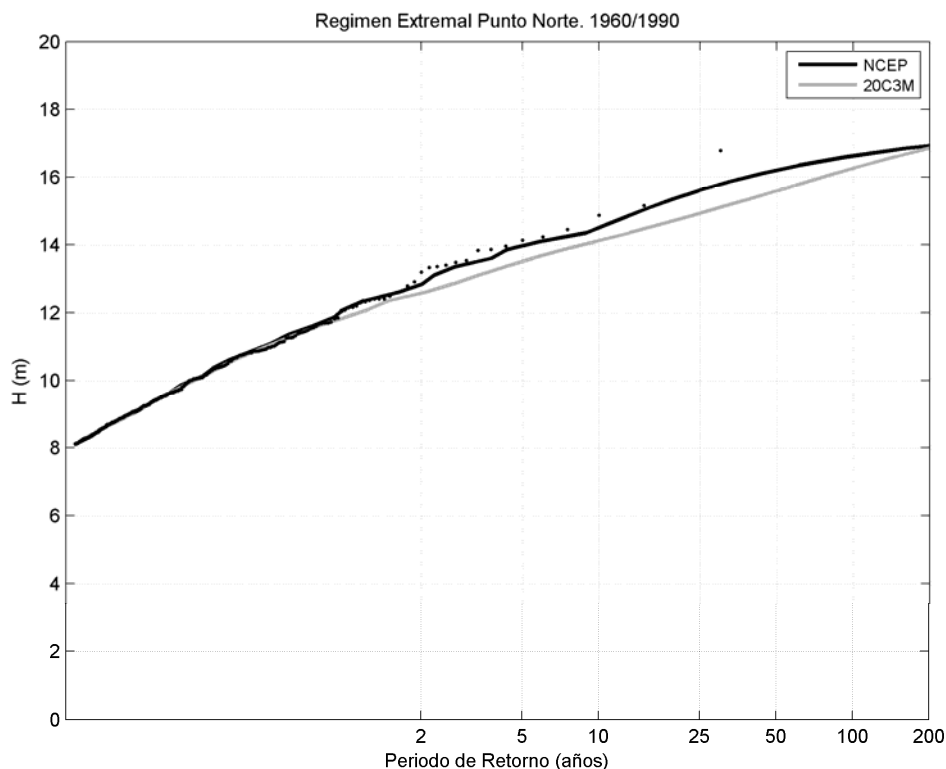


Figura 6.71 Régimen extremal de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del *ensemble* de los modelos climáticos globales (línea gris). Punto Norte

Ambos regímenes son muy similares y se ajustan a los eventos extremos ocurridos en ese período de tiempo. El *ensemble* de modelos climáticos reproduce bien el régimen extremal ocurrido en el período de control.

A partir de las proyecciones de campos de presión de los modelos climáticos, se ha obtenido el régimen extremal de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 en los escenarios A1B, A2 y B1. La Figura 6.72 muestra la proyección de los regímenes en cada período de tiempo y para cada escenario y el régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 obtenido para el escenario 20C3M.

En los tres períodos de tiempo las proyecciones para los distintos escenarios son muy similares. El régimen extremal del escenario A1B se encuentra muy próximo al del 20C3M, mientras que los correspondientes a los escenarios A2 y B1 son, en los tres períodos de tiempo, mayores. Para apreciar mejor los posibles cambios entre cada período, escenario y respecto al régimen extremal histórico en la Figura 6.73 se representan los incrementos de altura de ola (cm) en los cuantiles asociados a períodos de retorno 20, 50 y 100 años en cada período de tiempo y escenario del siglo XXI.

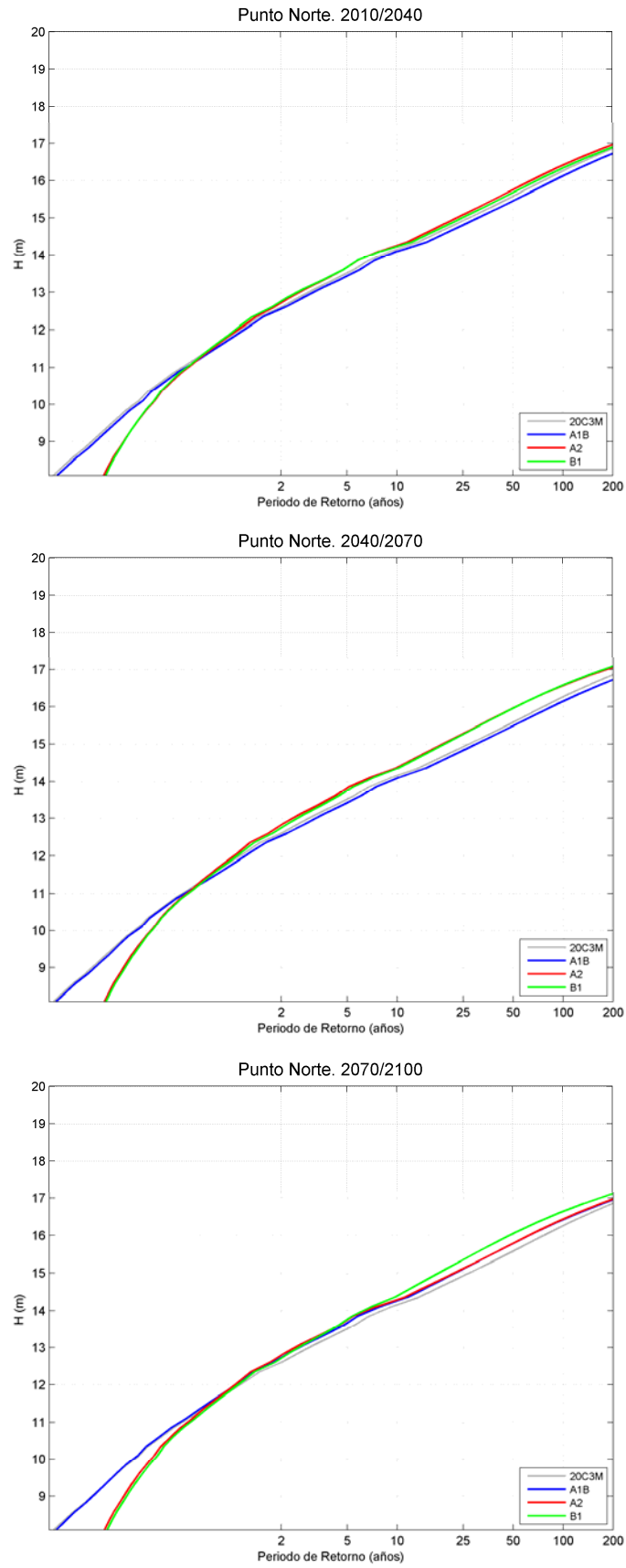


Figura 6.72 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Punto Norte

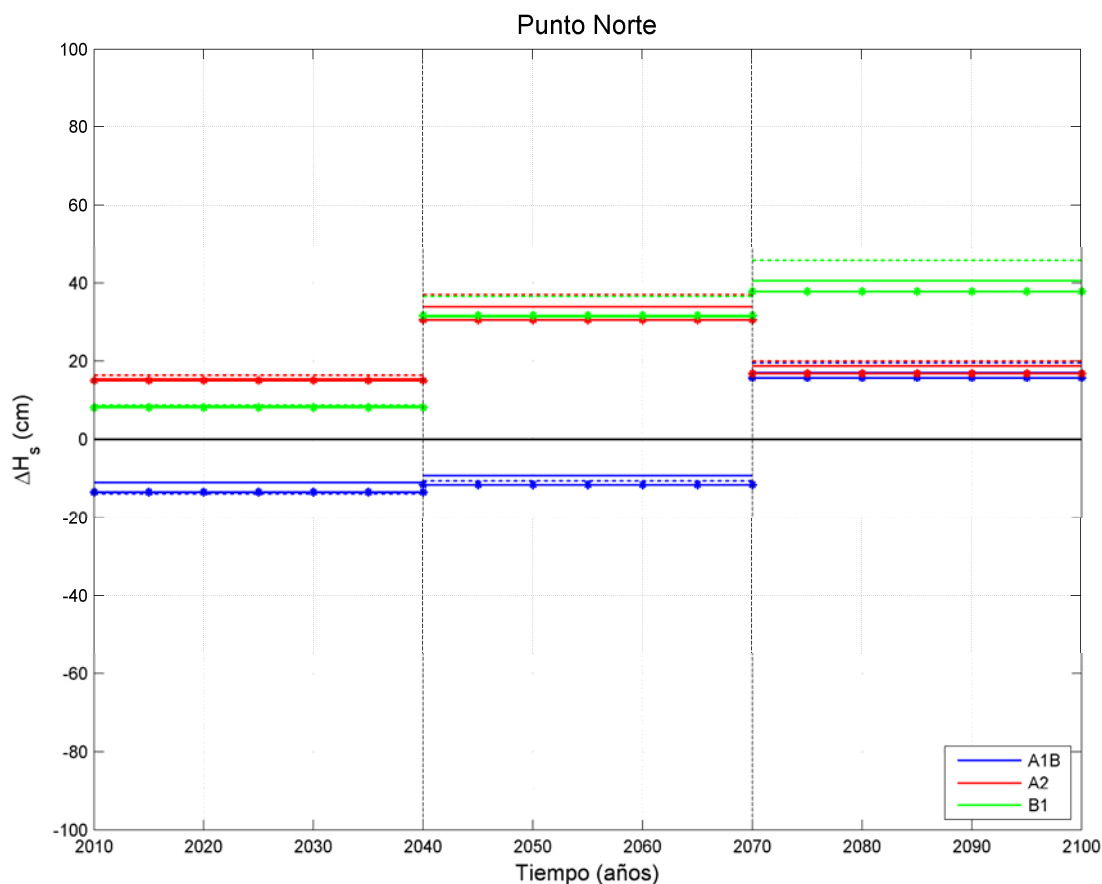


Figura 6.73 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Punto Norte

En el gráfico de la Figura 6.73 se puede ver que el aumento o disminución de los cuantiles de altura de ola, respecto al siglo XX, va ligado al escenario analizado.

En términos de evolución temporal, los dos primeros períodos de tiempo muestran un clima marítimo extremal en aumento. Para los escenarios A2 y B1 el régimen extremal de oleaje es más severo que en el siglo XX, mientras que para el escenario A1B es más suave. En los últimos 30 años del siglo XXI, la tendencia creciente del régimen extremal se mantiene para los escenarios B1 y A1B, mientras que el escenario A2 presenta una disminución en la severidad del clima marítimo extremal.

En términos de escenarios, el escenario A1B presenta una disminución en la severidad del clima marítimo extremal con respecto al siglo XX en los 2 primeros tercios de siglo. La disminución más fuerte se produce en los cuantiles elevados, siendo $\Delta H_{s_{100}} = -13.4$ cm en el período 2010-2040. En el período 2040-2070 el régimen extremal sufre un

ligero ascenso con respecto al período anterior, pero sigue siendo más suave que en el siglo XX. En los últimos 30 años del siglo XXI sufre un aumento con respecto al período anterior (26.2 cm en $H_{s_{20}}$), pasando a ser más severo que en el período de control del siglo XX. En todos los casos, los cuantiles medios-bajos (asociados a 20 y 50 años) son los que presentan un mayor aumento. El escenario A2 muestra, en todo el siglo XXI, un clima marítimo extremal más severo que en el escenario 20C3M. Se produce un aumento en el período 2040-2070 y una posterior disminución en los últimos 30 años de siglo. Las diferencias más grandes corresponden a los períodos de retorno bajos, habiendo un aumento de 34 cm en la $H_{s_{20}}$ del período 2040-2070 con respecto a la del siglo XX. Por último, el escenario B2 muestra un clima marítimo extremal mayor que en el siglo XX y en aumento a lo largo del siglo XXI. Al igual que en los dos escenarios anteriores, los mayores aumentos corresponden a la parte baja del régimen extremal. En el período 2070-2100 el incremento de $H_{s_{20}}$ con respecto al período de control del siglo XX es de 40.5 cm de altura de ola.

6.7.3 Proyecciones de clima marítimo extremal. Coruña

En primer lugar se ha obtenido el régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 a partir de los datos históricos de presiones y el régimen extremal proyectado al escenario 20C3M en el mismo período de tiempo. En la Figura 6.74 se muestra la comparación entre ambos regímenes.

Como se puede observar, el régimen extremal histórico de oleaje y el obtenido a partir del ensemble de modelos climáticos es prácticamente igual.

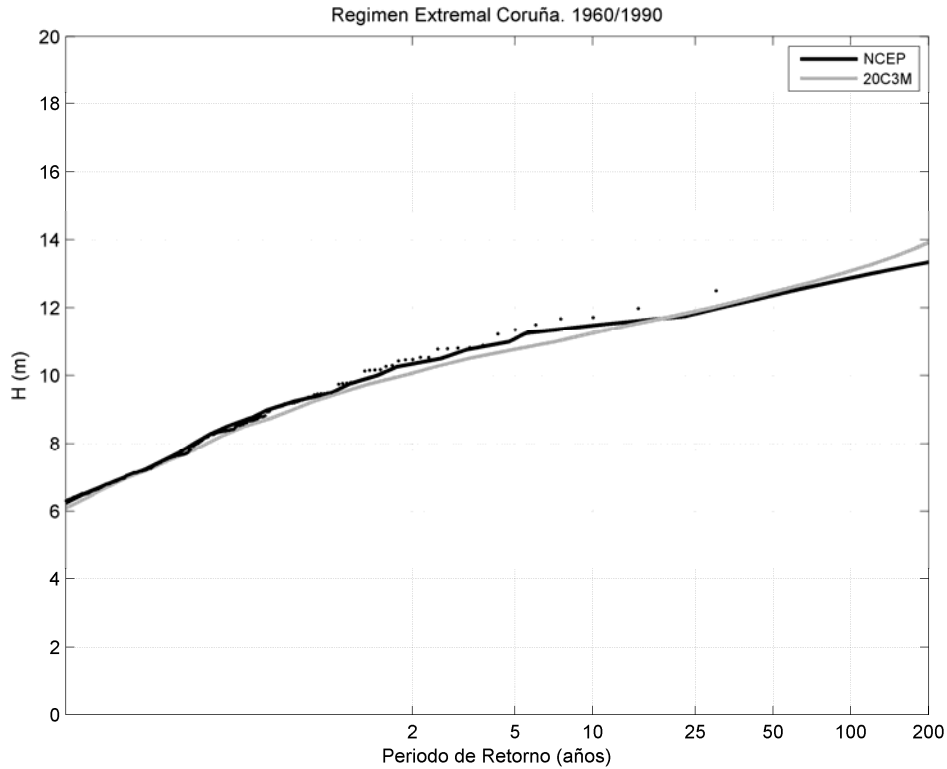


Figura 6.74 Régimen extremal de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del *ensemble* de los modelos climáticos globales (línea gris). Coruña

Una vez comprobada la similitud de los regímenes en el período de control se ha proyectado el clima marítimo extremo de Coruña a los tres escenarios de estudio y en los distintos períodos de tiempo (Figura 6.75).

Para poder apreciar las diferencias entre las proyecciones de régimen extremal de oleaje en la Figura 6.76 se representan los cuantiles asociados a 20, 50 y 100 años de período de retorno del régimen extremal histórico y de las proyecciones a los distintos escenarios.

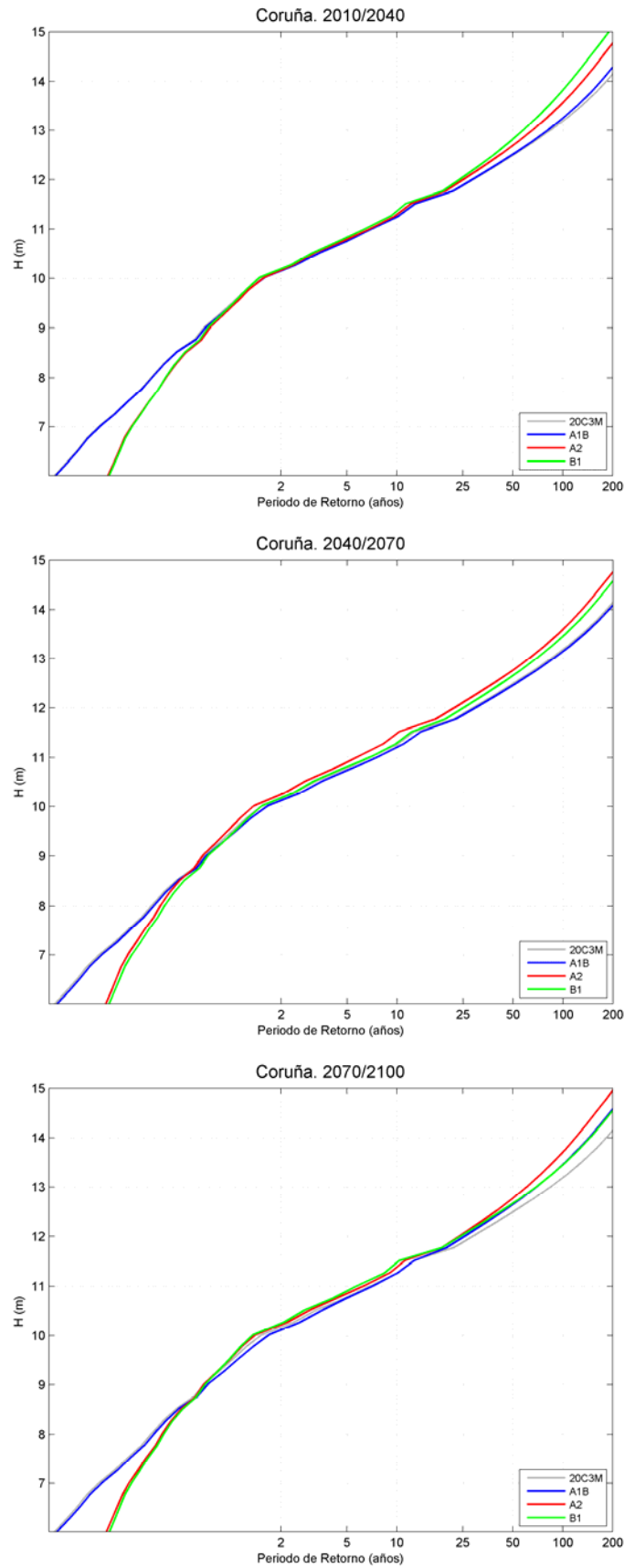


Figura 6.75 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Coruña

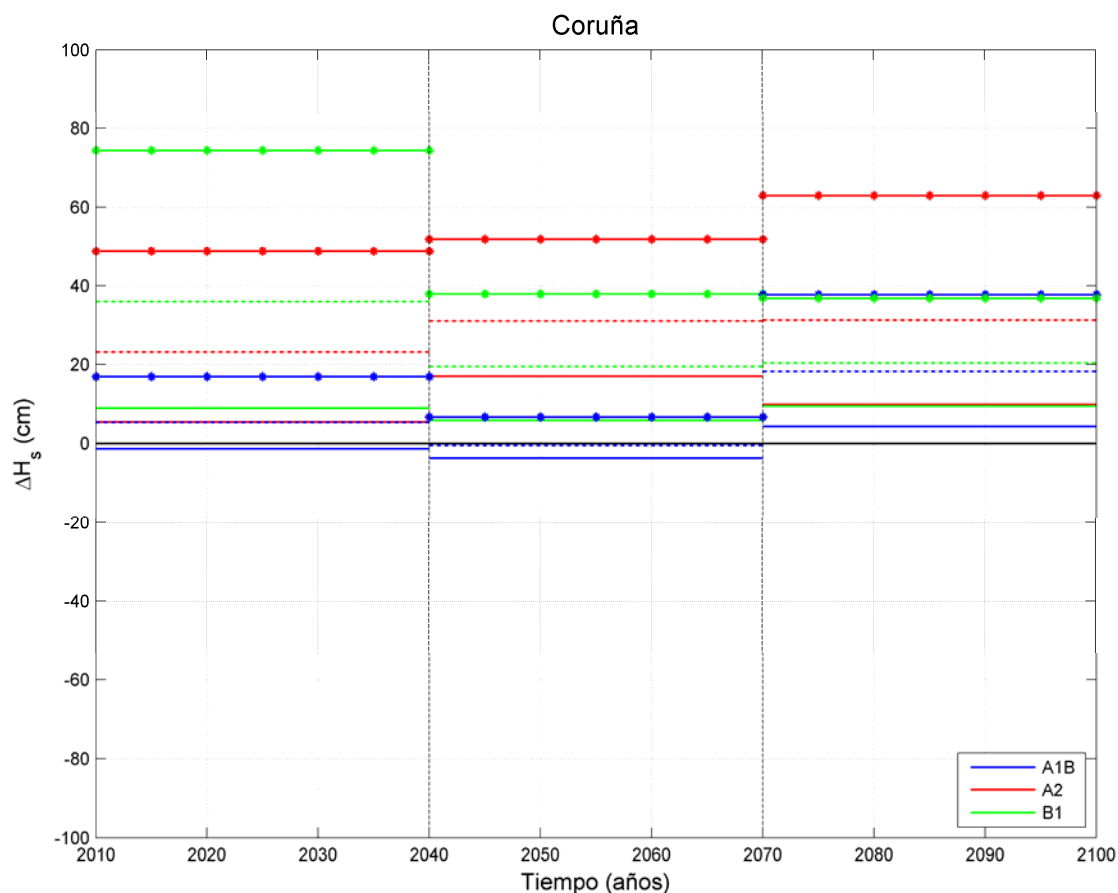


Figura 6.76 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Coruña

Las proyecciones del régimen extremal de oleaje dan lugar, en términos generales, a un aumento de la severidad del clima marítimo en este punto. El aumento más grande se produce en el cuantil más elevado (100 años) que experimenta una diferencia de 75 cm (para el escenario B1) con respecto al siglo XX, en el período 2010-2040.

La evolución del siglo XXI comienza con un aumento en la severidad del clima marítimo en prácticamente todos los cuantiles y para los tres escenarios (el cuantil de 20 años para el escenario A1B sufre una disminución muy pequeña, respecto al siglo XX, casi inapreciable). El segundo período del siglo sufre, en líneas generales, una disminución en los períodos elevados y se mantiene en los períodos bajos para los escenarios A1B y B1, mientras que el escenario A2 muestra un aumento en todos los cuantiles con respecto al período anterior. Por último, el período 2070-2100 vuelve a sufrir un aumento en el régimen extremal con respecto al período anterior.

El período 2010-2040 muestra proyecciones distintas de $H_{s_{20}}$, $H_{s_{50}}$ y $H_{s_{100}}$. De los tres escenarios, el A1B es el que da lugar a un clima marítimo extremal más suave y parecido al siglo XX ($\Delta H_{s_{20}} = -1.3$ cm, $\Delta H_{s_{50}} = 5.3$ cm y $\Delta H_{s_{100}} = 17$ cm) y el B1 el que presenta mayores variaciones y un régimen más severo ($\Delta H_{s_{20}} = 9$ cm, $\Delta H_{s_{50}} = 36$ cm y $\Delta H_{s_{100}} = 74.4$ cm). En la parte central del siglo XXI se produce una disminución en el clima marítimo extremal para los escenarios A1B y B1, con respecto al período anterior. Sin embargo, el escenario A2 muestra un clima marítimo extremal en aumento, siendo este aumento más acusado en los cuantiles bajos. Por último, en el período 2070-2100 el régimen extremal aumenta para los escenarios A1B y A2, mientras que para el B1 se mantiene como en el período anterior.

6.7.4 Proyecciones de clima marítimo extremal. Cádiz

Al igual que en los otros dos puntos de estudio, en Cádiz se ha obtenido inicialmente el régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990. Por un lado, se ha obtenido a partir de los datos históricos de presiones y, por otro, se ha proyectado al escenario 20C3M en el mismo período de tiempo. En la Figura 6.77 se muestra la comparación entre ambos regímenes.

Los regímenes extremales de oleaje obtenidos en Cádiz en el período 1960-1990 son los que más difieren entre sí. El régimen extremal obtenido con el *ensemble* de modelos climáticos proporciona alturas de ola menores que el régimen obtenido con los datos históricos, para un mismo período de retorno. En este punto los modelos globales subestiman el clima marítimo extremal de la zona. Hay que tener en cuenta, que el reanálisis de oleaje utilizado (GOW 1.0) termina en el Estrecho de Gibraltar (contorno cerrado), por lo que los oleajes provenientes de levante en Cádiz no están bien modelados. Por esta razón los modelos climáticos no son capaces de reproducir adecuadamente el clima marítimo extremal de la zona.

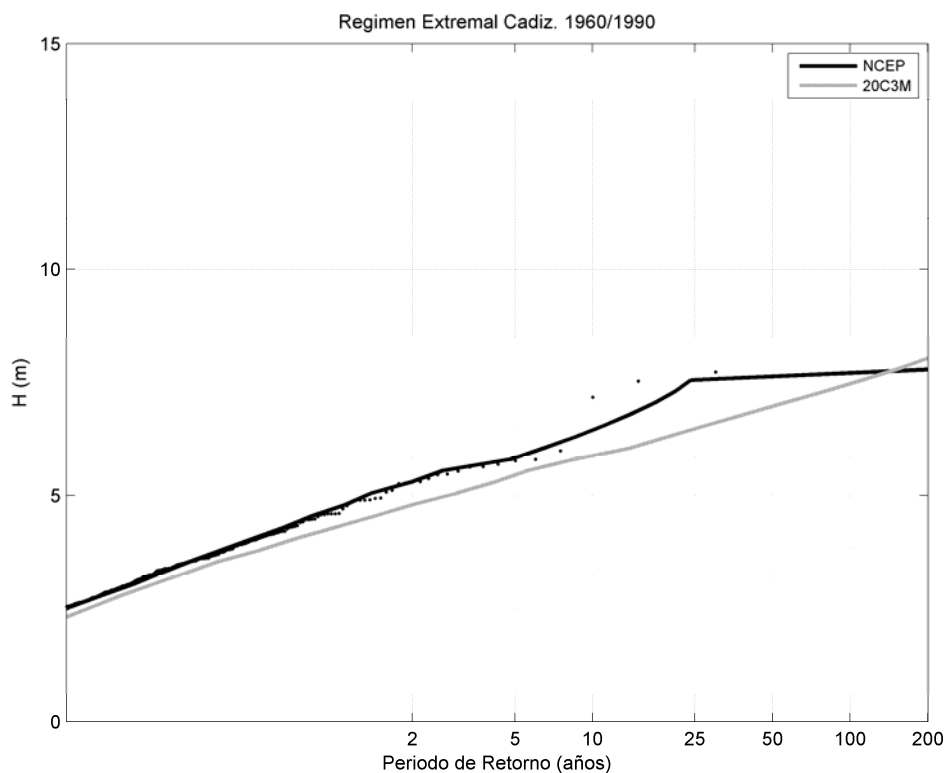


Figura 6.77 Régimen extremo de oleaje obtenido a partir de NCEP (línea negra) y a partir del *ensemble* de los modelos climáticos globales (línea gris). Cádiz

Las proyecciones del régimen extremo en Cádiz a distintos escenarios y diferentes períodos de tiempo se muestran en la Figura 6.78.

En general, el régimen extremo para el escenario A1 se encuentra, a lo largo de todo el siglo XXI, por encima del régimen del escenario 20C3M, en correspondiente al escenario B1 está por debajo y el del A1B es bastante similar. Para apreciar mejor las diferencias se han representado los incrementos de altura de ola en los cuantiles de 20, 50 y 100 años de período de retorno, con respecto al escenario 20C3M, en la Figura 6.79.

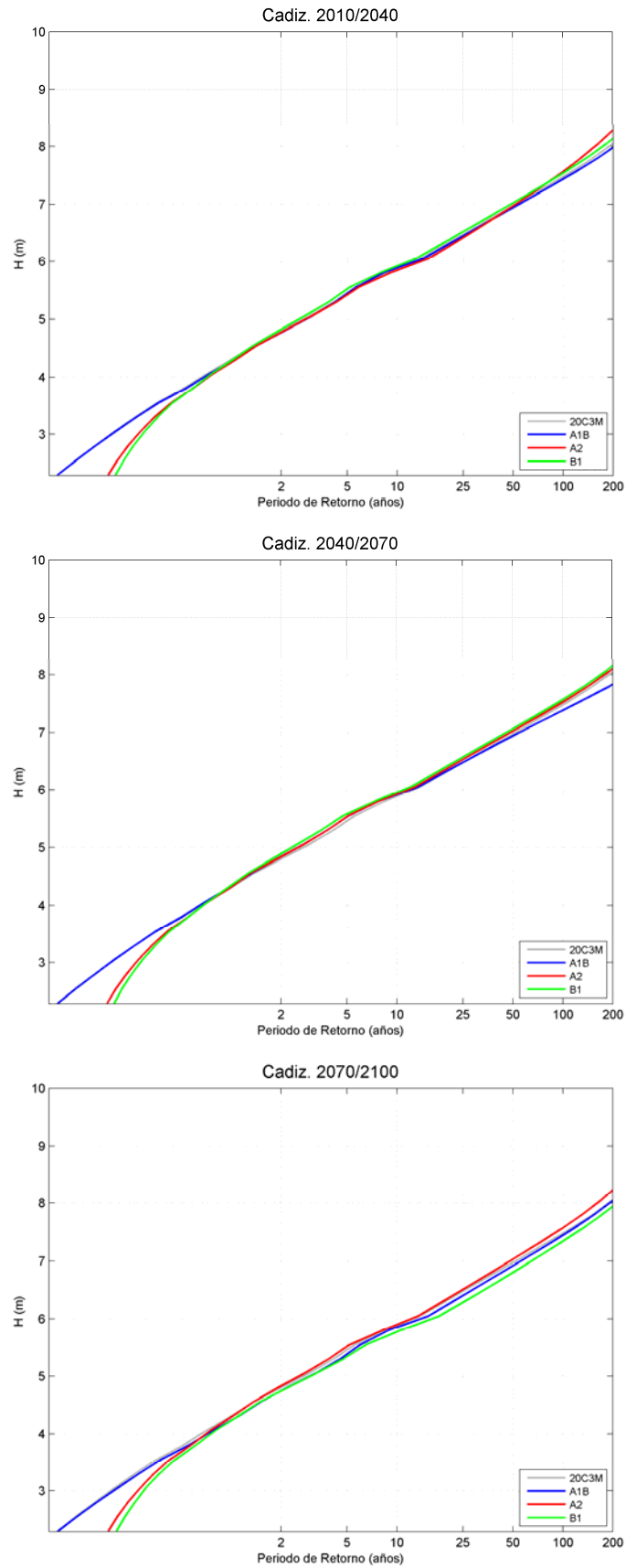


Figura 6.78 Proyecciones de los regímenes extremales de oleaje en los períodos 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100 a los escenarios A1B (línea azul), A2 (línea roja) y B1 (línea verde) y régimen extremal de oleaje en el período 1960-1990 en el escenario 20C3M (línea gris). Cádiz

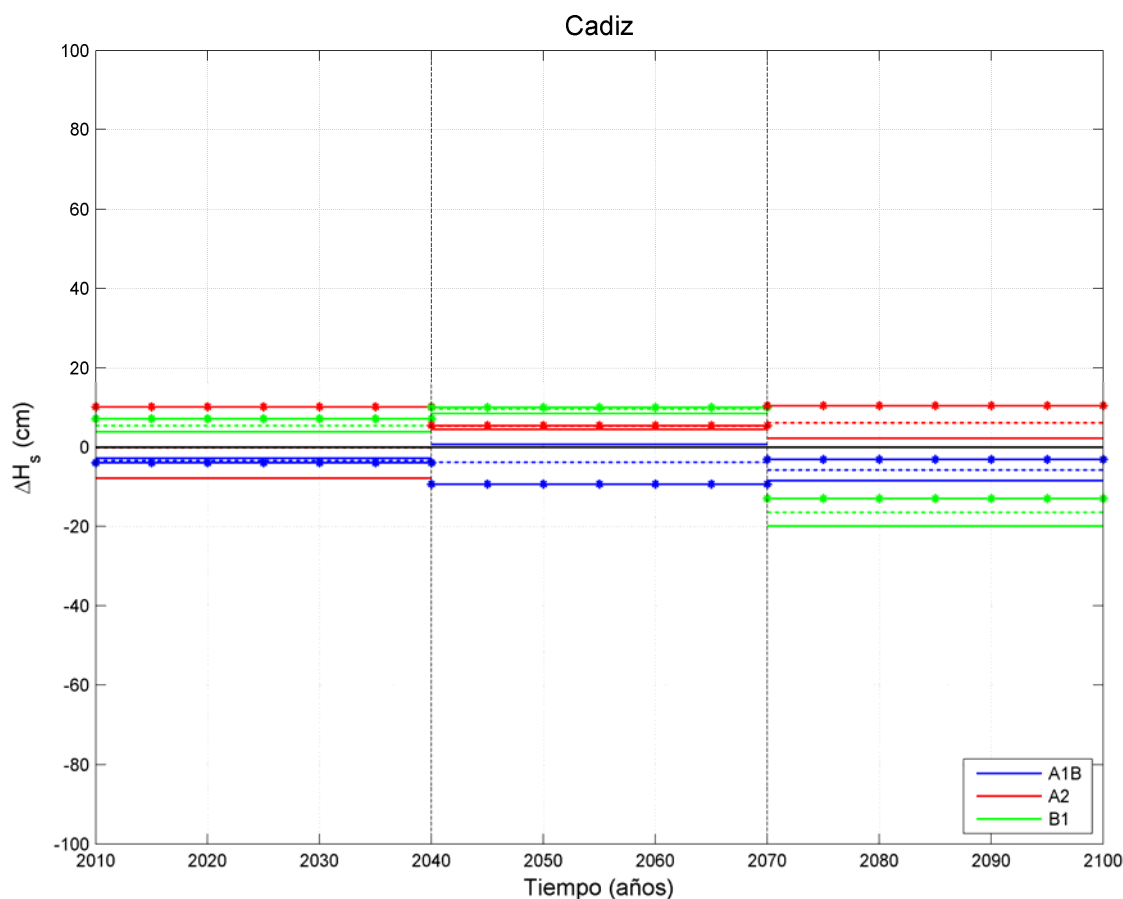


Figura 6.79 Cuantiles de períodos de retorno de 20 (línea continua), 50 (línea discontinua) y 100 (línea punteada) años de las proyecciones a los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) en los períodos de tiempo 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100. Cádiz

En términos generales se puede hablar de una disminución en la severidad del clima marítimo extremal en Cádiz a lo largo del siglo XXI para los escenarios de proyección B1 y A1B. Por el contrario, el escenario A2 muestra un ligero aumento del régimen extremal con respecto al siglo XX.

En el período 2010-2040 el escenario A1B muestra una disminución del régimen extremal en todos los cuantiles (por ejemplo, $\Delta H_{s_{100}} = -4$ cm) con respecto al período de control del siglo XX. El escenario B1 muestra un incremento en todos los cuantiles de altura de ola ($\Delta H_{s_{100}} = 7.1$ cm) y el escenario A2 presenta resultados más dispares, con mayor aumento en los cuantiles altos del régimen extremal ($\Delta H_{s_{100}} = 10.1$ cm) y mayor disminución en los cuantiles bajos ($\Delta H_{s_{20}} = -7.7$ cm) con respecto al período de control del escenario 20C3M. En el período 2040-2070, el escenario A1B presenta una disminución del clima marítimo extremal en el cuantil alto y un aumento en la parte

baja de la distribución, con respecto al período anterior, pero siempre manteniendo un clima marítimo extremal similar o más suave que en el siglo XX. El escenario B1 presenta un ligero aumento en la severidad del régimen, mientras que el escenario A2 da lugar a un régimen extremal más acotado, disminuyendo los cuantiles elevados y aumentando la parte baja del régimen. Los últimos 30 años del siglo XXI muestran una disminución del clima marítimo extremal para el escenario B1, respecto al período anterior, y alcanzando valores de los cuantiles más bajos que en el siglo XX (disminuye más acusadamente la parte baja de la distribución). El escenario A1B presenta una disminución en los cuantiles medios y bajos del régimen extremal y un ligero aumento del H_{5100} con respecto al período anterior, manteniéndose el clima marítimo extremal más suave que en el siglo XX. Por último, el escenario A2, muestra un nuevo repunte en la severidad del clima marítimo extremal en Cádiz con respecto al período anterior, presentando un incremento de H_{5100} respecto al siglo XX de 10.42 cm.

Hay que tener en cuenta que estas variaciones se presentan con respecto al régimen extremal para el escenario 20C3M, que en este caso difiere del histórico por las razones explicadas anteriormente. Para tener en cuenta estas diferencias, habría que hacer una corrección del régimen extremal para el 20C3M y aplicarla posteriormente a los resultados de las proyecciones del siglo XXI.

6.7.5 Discusión

El estudio del oleaje en el siglo XXI se plantea bajo dos líneas de actuación. Una primera vía es el análisis estadístico de series temporales históricas que permite obtener la tendencia de largo plazo del período de tiempo analizado. Asumiendo la inercia del sistema climático, a partir de esta tendencia se extrapolan los valores de oleaje al siglo XXI, teniendo en cuenta que esta técnica permite obtener resultados fiables en períodos de tiempo en torno a los 30 años. La otra opción de estudio del oleaje en el siglo XXI es su proyección para distintos escenarios de cambio climático. En este caso se asumen unas condiciones futuras y ficticias de emisiones de gases de efecto invernadero basadas en la evolución de la población, desarrollo de las tecnologías, uso de materias primas, etc. Estas nuevas condiciones de emisiones alimentan los modelos globales climáticos que son capaces de obtener los futuros valores de distintas variables climáticas (temperatura, presión a nivel del mar, geopotencial...). El oleaje es una variable derivada

del viento y la presión por lo que, a partir éstos, se podrán obtener las proyecciones de oleaje para los distintos escenarios (a partir de *downscaling* estadístico o dinámico).

En esta tesis, los resultados de oleaje en el siglo XXI se han centrado en la vía de análisis mediante proyecciones. Sin embargo, también se han estudiado las tendencias de largo plazo en los datos históricos (oleaje en Sudamérica y mediterráneo español y Golfo de Cádiz), aunque sin extrapolar resultados al siglo XXI. Ambas vías se consideran necesarias y complementarias para hacer un buen análisis del oleaje en el futuro. Por ello, para los tres puntos del Atlántico Norte, en los que se ha proyectado el régimen extremal, se ha hecho un análisis de la tendencia de largo plazo y se han extrapolado los resultados hasta el año 2040. El objetivo es comprobar que los resultados obtenidos de ambas formas son coherentes en tendencia y magnitud.

El análisis de la tendencia de largo plazo en el Punto Norte, Coruña y Cádiz se ha hecho a partir de un modelo no estacionario de Pareto-Poisson basado en el método POT. Para la selección de los eventos extremos se ha fijado como umbral la altura de ola correspondiente al percentil del 90 % en cada punto, y una independencia entre temporales de 3 días.

En cada punto se ha modelado la estacionalidad y la tendencia media de largo plazo. Los valores obtenidos para la tendencia se pueden ver en la Tabla 6.9:

	Punto Norte	Coruña	Cádiz
β_{LT} (cm/año)	0.36	0.91	0.09

Tabla 6.9 Valores de la tendencia media de largo plazo

En la Figura 6.80 se muestran las excedencias sobre el umbral en cada punto, el valor del umbral y el cuantil de altura de ola asociado a 50 años de período de retorno, durante el período histórico y extrapolado hasta el año 2040.

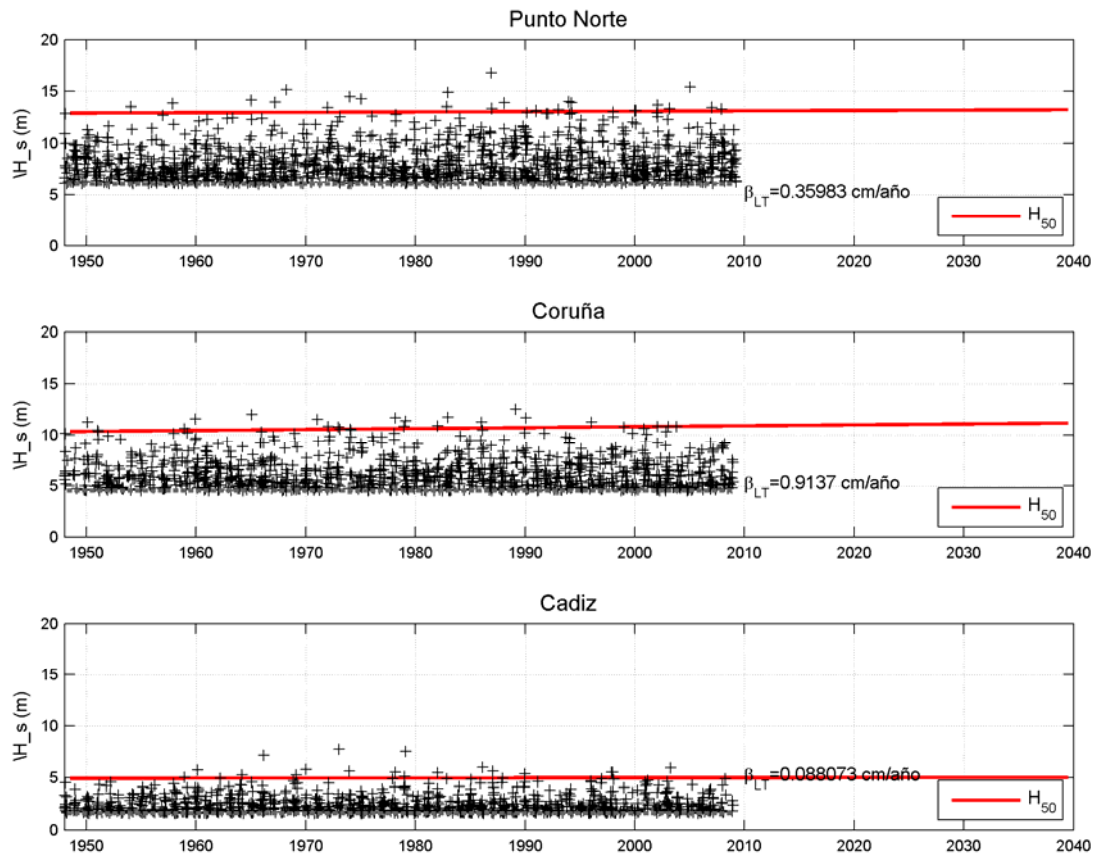


Figura 6.80 Población de extremos utilizada (cruces negras), umbral (línea discontinua gris) y cuantil de 50 años de período de retorno (línea roja) extrapolado al año 2040 en cada punto de estudio

Se puede ver que en los tres puntos hay una tendencia de aumento, siendo más acusada en Coruña ($\beta_{LT}=0.9137$ cm/año) y próxima a cero en Cádiz ($\beta_{LT}=0.09$ cm/año). Mediante las proyecciones, el patrón general encontrado en los tres puntos, en el período 2010-2040, es similar, con un aumento importante en Coruña y muy pequeño (incluso disminución del régimen extremal, dependiendo del escenario) en Cádiz. Para poder comparar mejor los resultados de régimen extremal en el siglo XXI obtenidos mediante extrapolación a partir de la tendencia de largo plazo y mediante proyecciones para distintos escenarios se presenta la Figura 6.81. En ella se muestran las diferencias de $H_{s_{50}}$ para las proyecciones y para la extrapolación con tendencias. Se representa, para el año 2040, por un lado, en los escenarios A1B, A2 y B1 la diferencia entre la $H_{s_{50}}$ del período 2010-2040 y la $H_{s_{50}}$ del período de control 1960-1990 y, por otro, la diferencia entre $H_{s_{50}}$ en el año 2040 (obtenida extrapolando la tendencia) y la $H_{s_{50}}$ en el año 1990.

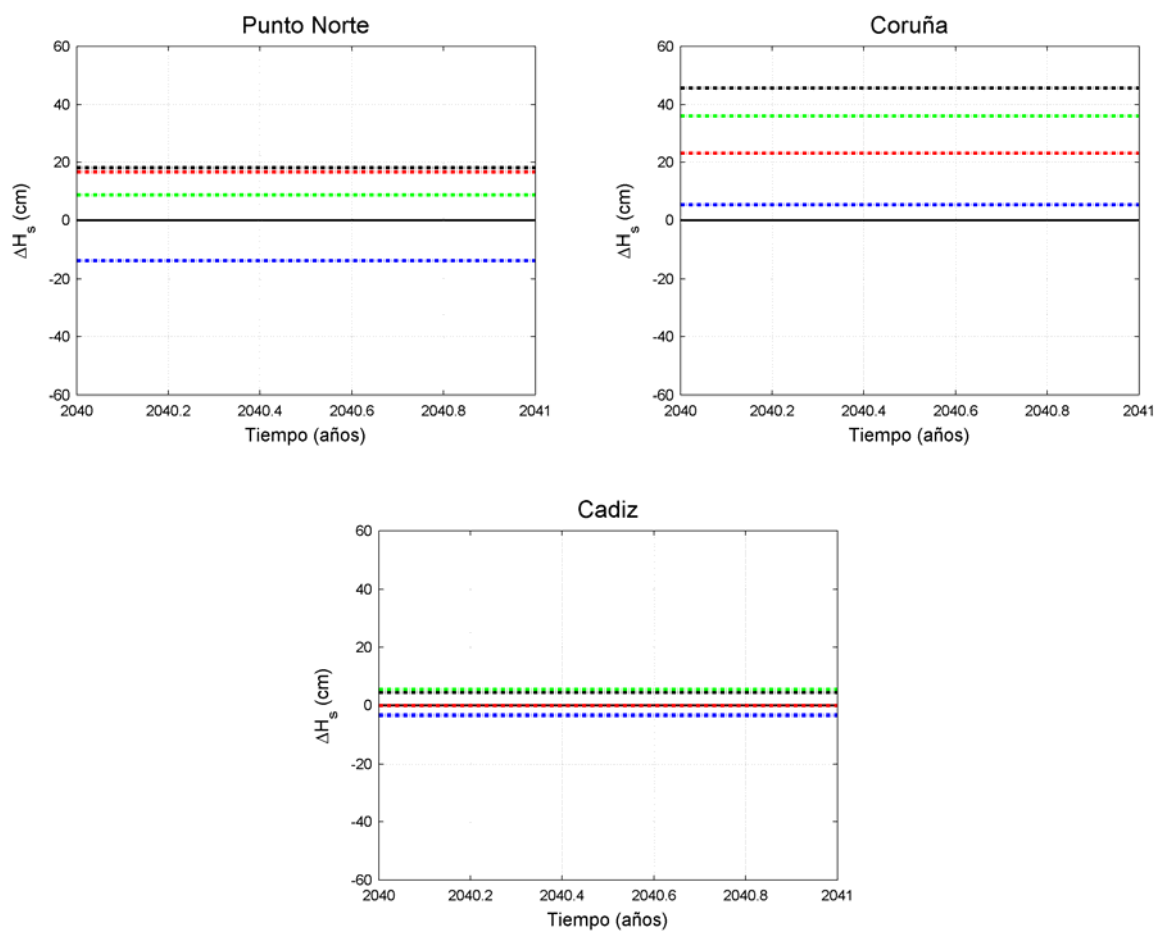


Figura 6.81 Diferencias entre la $H_{s_{50}}$ del período 2010-2040 y 1960-1990 para los escenarios A1B (azul), A2 (rojo) y B1 (verde) y diferencias entre la $H_{s_{50}}$ de 2040 y 1990 obtenidas mediante la extrapolación de tendencias (negro)

Como se puede ver en la Figura 6.81, en los tres casos, los resultados obtenidos mediante la extrapolación de la tendencia de largo plazo y mediante las proyecciones son coherentes. En los tres puntos el patrón de cambio obtenido es similar, con mayor aumento del régimen extremal en Coruña y menor en Cádiz. Por otro lado, todos los resultados obtenidos tiene el mismo orden de magnitud en cada punto. En el Punto Norte el incremento de $H_{s_{50}}$ calculado a partir de la tendencia es de $\Delta H_{s_{50}} = 18$ cm, similar al obtenido para el escenario A2, en Coruña, es de $\Delta H_{s_{50}} = 45.6$ cm, algo superior al obtenido para el escenario B1, y en Cádiz es de $\Delta H_{s_{50}} = 4.4$ cm, muy similar al dado por el escenario B1. En los tres casos, el valor obtenido con la tendencia de largo plazo muestra una cota superior en el aumento del régimen extremal, siendo los resultados obtenidos para los escenarios menores.

Mediante este análisis comparativo se pueden obtener varias conclusiones. Ambos métodos son opciones válidas para la obtención del régimen extremal en el siglo XXI y a la vez complementarias. El método de extrapolación del régimen extremal a partir de la tendencia de largo plazo se puede utilizar para un horizonte de años similar al representativo de un período climático (30 años) siempre y cuando se cuente con una serie histórica suficientemente larga. Estos resultados, además de fiables, sirven para comprobar que los modelos climáticos son capaces de reproducir la tendencia de cambio de los últimos años. Mediante los resultados obtenidos en los tres puntos analizados, se han obtenido resultados similares con ambos métodos, lo que da fiabilidad a ambas vías de aproximación.

6.8 Conclusiones

En este capítulo se aborda el estudio de la variabilidad temporal del clima marítimo extremal en un punto haciendo uso de la climatología sinóptica.

Se plantean tres escalas temporales (corto, medio y largo plazo) para las que se presentan tres metodologías diferentes. En los tres casos se combinan los patrones de tiempo del área de influencia del oleaje de estudio con un modelo estadístico de extremos.

Para la predicción a corto plazo se plantea una metodología basada en la SOM de tipos de tiempo de la zona de estudio y un modelo estadístico GEV que permite inferir en el régimen extremal de oleaje dada una determinada situación sinóptica.

En la predicción a largo plazo se plantea una metodología que combina una SOM de los patrones de tiempo que generan extremos en el punto de estudio y un modelo de Pareto con el que se modelan esos extremos. La agregación de los regímenes extremales de cada situación sinóptica dará lugar al régimen extremal anual del punto.

Por último, para la escala del muy largo plazo se ha propuesto una metodología con la que poder proyectar a distintos escenarios de cambio climático. 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 en el punto de estudio. La agregación de los

regímenes de las familias de oleaje que generan extremos en la zona permite calcular el régimen extremal anual del punto. Con esta metodología también es posible obtener los regímenes extremales estacionales, haciendo uso de la información de probabilidades de ocurrencia de la SOM en las distintas estaciones.

Se han aplicado las tres metodologías propuestas en tres puntos de estudio (un punto del Atlántico Norte, Coruña y Cádiz) y además se ha proyectado el régimen extremal de oleaje de estos puntos a los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B1. Los resultados obtenidos muestran, para las proyecciones en Coruña, un aumento general en la severidad del régimen extremal con respecto al siglo XX y, para las proyecciones de Cádiz una tendencia de disminución general en el clima marítimo extremal. En cuanto al punto del Atlántico Norte, los tres escenarios muestran un clima marítimo extremal en aumento a lo largo del siglo XXI, pero más acusado para los escenarios A2 y B1 que muestran valores más elevados que en el siglo XX, mientras que el A1B presenta valores de altura de ola extremal más bajos que en el siglo XX.

Se ha hecho un análisis comparativo entre los resultados de régimen extremal de oleaje en el siglo XXI obtenidos a partir de las proyecciones para los escenarios de cambio climático y a partir de la extrapolación con tendencia media de largo. Se ha obtenido la tendencia de largo plazo en los tres puntos mediante un modelo de Pareto-Poisson basado en el método POT, en el que se ha modelado también la estacionalidad. Se ha obtenido el valor de la H_{50} en el año 2040, mediante extrapolación, y se ha comparado con los resultados obtenidos para las proyecciones en el período 2010-2040. Los resultados muestran resultados coherentes con ambos métodos, obteniendo el mismo patrón de cambio en todos los puntos y los mismos órdenes de magnitud. Este análisis pone de manifiesto la validez de ambos métodos y su carácter complementario, pues la extrapolación a períodos de tiempo no muy lejanos permite comprobar la capacidad de los modelos climáticos de reproducir la tendencia histórica de cambio.

Este estudio permite realizar *downscaling* estadístico de extremos de oleaje, pudiéndose utilizar para predicciones probabilísticas a corto y medio plazo, para la definición a largo plazo de régimen extremal y para las proyecciones para los distintos escenarios de cambio climático del IPCC a lo largo del siglo XXI.

Cabe señalar, por otro lado, que la desagregación de las distribuciones de extremos por familias y con su frecuencia de presentación puede utilizarse en simulación (por ejemplo Método de Montecarlo) resultando una herramienta muy valiosa para el análisis del ciclo de vida de las estructuras marítimas teniendo en cuenta la climatología y la variabilidad climática de una forma explícita.