

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 7

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones

Esta tesis se ha centrado en el estudio de la variabilidad climática de valores extremos de oleaje a distintas escalas espaciales y temporales. En primer lugar, se ha hecho un análisis comparativo de varios modelos estadísticos no estacionarios de extremos con el objetivo de establecer cuáles son los más adecuados para el estudio de la variabilidad climática de extremos de oleaje a distintas escalas.

Se ha analizado el clima marítimo extremal a escala global y regional teniendo en cuenta los procesos físicos propios de cada escala espacial. A escala global se ha estudiado la

variabilidad estacional e interanual del clima marítimo mediante datos de satélite. En cuanto a la escala regional, se ha estudiado la variabilidad estacional e interanual del clima marítimo extremal del Sur de Europa utilizando datos de satélite y la variabilidad estacional y la tendencia de largo plazo en América del Sur mediante datos de reanálisis.

Se ha desarrollado una metodología integral para evaluar la variabilidad espacial y temporal del clima marítimo extremal en profundidades reducidas (escala local).

Por otro lado, se ha analizado el clima marítimo extremal a distintas escalas temporales haciendo uso de la climatología sinóptica, combinando los patrones de tiempo del área de influencia del oleaje en un punto con un modelo estadístico de extremos. 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.

7.1.1 Resumen de aportaciones

- Se han comparado dos modelos distintos (GEV y Pareto-Poisson) con la misma escala temporal para conocer cuál de los dos modela mejor el régimen extremal de oleaje a esa escala temporal. Además, se han analizado dos modelos GEV con distintas escalas de tiempo para la selección de eventos extremos con el objetivo de ver cuál de los dos resuelve mejor la variabilidad del régimen extremal en el punto estudiado.
- El uso de modelos no estacionarios de extremos y de distintas bases de datos ha puesto de manifiesto dos tipos de problemas analizados en esta tesis. El uso de modelos paramétricos complejos da lugar a elevados tiempos de computación. En esta tesis se han explorado y aplicado dos métodos automáticos de selección de parámetros, uno de los cuales ha permitido reducir considerablemente el tiempo computacional requerido. Por otro lado, el uso de bases de datos instrumentales, como por ejemplo satélites o boyas, puede dar lugar a inhomogeneidades en la serie temporal de trabajo que pueden generar resultados erróneos si no se tienen en cuenta. Para evitar esto, se ha desarrollado

un coeficiente de escala a aplicar en el modelo estadístico de extremos que evita la aparición de tendencias ficticias ligadas a las inhomogeneidades en la serie temporal de datos.

- Como síntesis del análisis y comparación de modelos no estacionarios para el estudio de la variabilidad climática de extremos de oleaje se aporta un cuadro y unas recomendaciones del uso de cada modelo en función del objetivo del estudio que se quiera realizar.
- Se ha analizado la variabilidad estacional e interanual de los extremos de oleaje en todo el globo utilizando un modelo GEV basado en el método de máximos mensuales. El estudio de la variabilidad estacional aporta 12 mapas de la variabilidad espacial de la $H_{s_{20}}$. El análisis de la variabilidad interanual se ha llevado a cabo utilizando índices climáticos característicos de distintas zonas del globo terrestre.
- En el estudio del Sur de Europa se ha analizado la variabilidad estacional e interanual a través de índices climáticos propios de esta zona y a través de las anomalías de presión a nivel del mar del Atlántico Norte.
- El estudio del oleaje en Sudamérica se ha centrado en la variabilidad estacional y la tendencia de largo plazo. En cuanto al estudio de la tendencia, se ha desarrollado un modelo que permite determinar el cambio en los extremos de oleaje en cada una de las estaciones del año.
- La metodología desarrollada para el análisis de la variabilidad climática del oleaje extremo en aguas someras se ha aplicado con éxito en el litoral mediterráneo español y Golfo de Cádiz, donde se ha estudiado la variabilidad intraanual y tendencia de largo plazo, así como variaciones espaciales del régimen extremal de oleaje de profundidades indefinidas a profundidades reducidas.
- Se ha planteado un nuevo enfoque del estudio de la variabilidad climática de los extremos de oleaje en un punto a través de la climatología sinóptica. Se han

desarrollado tres metodologías para el estudio en las escalas del corto, largo y muy largo plazo.

- La escala del corto plazo se plantea a través de una metodología basada en la SOM de tipos de tiempo de la zona de estudio y un modelo estadístico GEV que permite inferir el régimen extremal de oleaje dada una determinada situación sinóptica.
- En la escala del largo plazo se ha desarrollado una metodología que combina una SOM de los patrones de tiempo que generan extremos de oleaje en el punto de estudio y un modelo de Pareto con el que se modela esos extremos. La agregación de los regímenes extremales de cada situación sinóptica dará lugar a la definición del régimen extremal anual del punto.
- Para abordar la escala del muy largo plazo se ha propuesto una metodología con la que poder proyectar el régimen extremal en un punto para 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. La agregación de los regímenes de las familias de oleaje que generan extremos en la zona permite obtener el régimen extremal anual del punto. Esta metodología también permite obtener los regímenes extremales estacionales, haciendo uso de la información de probabilidades de ocurrencia de la SOM en las distintas estaciones.
- Se ha desarrollado un método para comprobar la capacidad de los modelos climáticos para reproducir los tipos de tiempo del área de estudio. Este método está basado en el concepto de entropía relativa entre redes auto-organizativas.
- Las metodologías propuestas para las distintas escalas temporales se han aplicado con éxito en tres puntos del Atlántico Norte: punto a 500 km al oeste de Irlanda, Coruña y Cádiz. En el corto y largo plazo se han definido los regímenes extremales característicos de cada punto y en el muy largo plazo se han proyectado para los escenarios A1B, A2 y B1, del IPCC, utilizando varios modelos climáticos.

7.1.2 Resumen de resultados

- Los resultados del análisis de la variabilidad climática de los extremos de oleaje a escala global, muestran, en la variación mes a mes, una mayor severidad y variabilidad en el Hemisferio Norte. En lo que respecta a la escala interanual, los índices climáticos AO, SAM y NIÑO 3 se perfilan como los más influyentes en el clima marítimo extremal a escala global.
- El estudio del clima marítimo extremal en el Sur de Europa muestra, en cuanto a la variabilidad mes a mes, un fuerte gradiente norte-sur en la cuenca atlántica y un patrón espacial complejo en el Mediterráneo. En lo referente a la variabilidad interanual los índices climáticos NAO y EA son los más influyentes en el Atlántico mientras que el EA/WR es especialmente relevante en el Mediterráneo.
- En el estudio del oleaje en Sudamérica los resultados de la variabilidad estacional ponen de manifiesto una variación a lo largo del continente con cambios claros de invierno a verano en latitudes altas. El estudio del largo plazo muestra una tendencia media de aumento de los extremos de oleaje en los últimos 61 años, a lo largo de, prácticamente, todo el continente. Estacionalmente, el patrón de tendencia es similar, destacando mayores valores de aumento en la Tierra de Fuego y las Malvinas durante el verano austral.
- El estudio del clima marítimo extremal en el litoral mediterráneo español y Golfo de Cádiz muestra una variación en el régimen a lo largo de la zona de estudio, con un clima marítimo más severo en la cara norte de la isla de Menorca y la Costa Brava, en Cataluña. También se observa la disminución en la severidad del régimen extremal de aguas profundas a aguas someras en los últimos 20 años.
- En lo que se refiere a la variabilidad intraanual el análisis revela una variación en la tasa de eventos extremos producida en profundidades indefinidas y profundidades reducidas. A través de tres ejemplos, se puede ver que en el Golfo

de Cádiz el ciclo semianual está más marcado en profundidades indefinidas, mientras que en el Mediterráneo se hace algo más notable en profundidades reducidas.

- Se ha analizado la tendencia media de largo plazo en los últimos 20 años encontrándose únicamente dos zonas estadísticamente significativas con tendencia de cambio. El Golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa en torno a los -4 cm/año, mientras que las Islas Baleares muestran una tendencia de aumento de los extremos del oleaje de 4.5 cm/año (como término medio).
- Los resultados de proyecciones de régimen extremal muestran una tendencia general de aumento de la severidad del clima marítimo extremal en Coruña para los tres escenarios, mientras que en Cádiz, en líneas generales, se produce una disminución en el régimen extremal. En cuanto al punto analizado en el Atlántico Norte, presenta un clima marítimo extremal en aumento a lo largo del siglo XXI para los tres escenarios, pero mientras que el A2 y B1 muestran un clima marítimo más severo que en el siglo XX, el escenario A1B presenta una disminución en la severidad del régimen extremal con respecto al período de control del siglo XX.

7.2 Futuras líneas de investigación

El desarrollo de esta tesis ha abierto nuevas líneas de investigación. A continuación se describen varias de ellas:

- Análisis de la variabilidad climática de los extremos de oleaje a escala global mediante datos de reanálisis que permitan estimar la tendencia de largo plazo.
- Análisis de la variabilidad climática de otras variables oceanográficas como marea meteorológica que permitan a su vez inferir la variabilidad de variables como cota de inundación, determinante en la gestión costera.

- Incorporación de la metodología integral de análisis del clima marítimo extremal en profundidades reducidas en el diseño de obras marítimas y planes de gestión costera.
- Estudio de la variabilidad climática de otras variables o recursos como transporte de sedimentos o recurso surf mediante la metodología planteada a partir de la climatología sinóptica.
- Análisis de otros sistemas de clasificación de situaciones sinópticas, como k -medias o el algoritmo de máxima disimilitud, los cuales tienen la ventaja de ser más eficientes en la búsqueda de patrones multidimensionales aunque, por contra, carecen de una visualización intuitiva como el caso de la SOM.
- Mejora en el ajuste de los parámetros de las funciones de distribución de extremos en cada celda y análisis de una posible función que suavice o proporcione un valor continuo de los parámetros en las celdas de la SOM.
- Análisis de sensibilidad en la elección de parámetros como tamaño de SOM, valor del umbral de oleaje o independencia entre temporales, los cuales son claves en el desarrollo de las metodologías presentadas para analizar el régimen extremal en un punto a partir de patrones de tiempo.
- Aplicación de la metodología de proyección del clima marítimo extremal para distintos escenarios en un área que permita encontrar patrones espaciales de cambio en el régimen extremal de oleaje.

