

VARIACIONES DEL RÉGIMEN EXTREMAL DEL CLIMA MARÍTIMO EN EL LITORAL ESPAÑOL EN EL PERIODO 1958-2001

Melisa MENÉNDEZ; Fernando J. MÉNDEZ; Iñigo J. LOSADA;
Raúl MEDINA y Ana J. ABASCAL

*Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas
Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria*

RESUMEN

El fenómeno global de cambio climático implica la posible alteración en factores climáticos, como es el clima marítimo. Un aspecto a estudiar de especial interés son las tendencias temporales de los eventos extremos. En este trabajo se analiza el régimen extremal de altura de ola, marea meteorológica y velocidad del viento a lo largo del litoral español para el periodo 1958-2001. Los resultados más significativos en un análisis preliminar, indican un aumento general de la marea meteorológica extremal y distintas tendencias en el oleaje y viento que llegan a nuestras costas en función de la localización geográfica.

Palabras clave: Clima marítimo, cambio climático, régimen extremal, nivel del mar, oleaje, distribución de Gumbel, tendencia.

ABSTRACT

The global warming implies the possible alteration in other forms of climate change, such as the wave climate. One interesting aspect to study is the variability of extreme events. In this work, the long-term extreme value distributions of significant wave height, surge and wind's velocity along the Spanish coast, in the period 1958-2001, are analysed. After a preliminary analysis, a positive trend of the extreme storm surge and changing trends in the wave and wind extreme values along the coast are detected.

Key words: Wave climate, climate change, long-term extreme value, sea level, wave, Gumbel distribution, trend.

1. INTRODUCCIÓN

En oceanografía, el clima marítimo se define a partir de la descripción estadística de la variación en el dominio del tiempo de los estados de mar en un área determinada (MASSEL, 1996). En concreto, el Estado de Mar se define a partir de un conjunto de variables geofísicas como son la altura de ola, dirección del flujo medio del oleaje, duración, variación del nivel del mar por borrascas, velocidad del viento, etc.

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

Actualmente nos encontramos en una situación de cambio climático a causa del incremento de la temperatura media global en la atmósfera. Como se describe en el tercer informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001) un mínimo incremento en la temperatura puede provocar cambios en la frecuencia y magnitud de eventos extremos. Varios autores han observado una tendencia positiva en la magnitud de diversos eventos extremos climatológicos. A modo de ejemplo, y en el campo de la hidrología, SMITH (1994) analizó series temporales de precipitación en el periodo 1910-1996 a lo largo de EEUU, obteniendo una tendencia global positiva para eventos extremos. Ya en el ámbito de la oceanografía, el grupo del proyecto europeo WASA (1998) afirma que las condiciones marítimas en el NE del Atlántico Norte a finales del siglo XX parecen ser comparables con el comportamiento de la última etapa del siglo XIX y principios del XX, y que parte de esa variabilidad se debe a la Oscilación del Atlántico Norte (HURRELL, 1995). La principal conclusión que obtienen es que el clima marítimo no presenta una tendencia sistemática significativa en los últimos 100 años. GREVENMEYER *et al.* (2000) relacionaron, para una serie temporal de 40 años en Hamburgo, datos de microseísmos (asociados a procesos de generación de olas en el océano) en etapas de invierno con temporales en el océano reconstruyendo el clima marítimo en el NE Atlántico. Las series temporales de datos resultantes implican una tendencia positiva con el tiempo. VIKEBO *et al.* (2003) analizaron datos de oleaje de eventos extremos para nueve estaciones situadas en la plataforma continental del continente noruego. Obtuvieron una tendencia positiva para las estaciones situadas en la parte central respecto a la costa de Noruega. BROMIRSKI *et al.* (2003) realizaron un estudio del comportamiento de la marea meteorológica en la costa Este de EEUU (1858-2000). No obtuvieron ningún cambio sustancial para la serie temporal media, sin embargo detectaron un incremento positivo significativo en el régimen extremal de invierno para los 140 años estudiados. El proyecto STOWASUS-2100, constituido por diversas instituciones europeas, ha estudiado tormentas regionales, oleaje y marea meteorológica en diversas zonas de Europa para dos escenarios: la situación climatológica actual y para un estado climatológico con un incremento de CO₂ debido al efecto invernadero. Las conclusiones que obtienen presentan distintos resultados para ambos escenarios, demostrando la importancia del cambio climático en la región noratlántica.

Los objetivos que se plantean son el análisis de tendencias para el régimen extremal de diversas variables geofísicas en el litoral español, durante el periodo 1958-2001 y señalar las consecuencias que implica la variabilidad temporal del clima marítimo en el diseño de obras marítimas. El presente trabajo se encuentra enmarcado en el “Estudio sobre los efectos del cambio climático en la costa española” que la Dirección de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente ha encargado a la Universidad de Cantabria (MÉNDEZ *et al.*, 2004, en este congreso).

La estructura que presenta el artículo esta organizada de la siguiente manera: la sección 2 es una exposición de la base de datos utilizada; la sección 3 es una descripción de las técnicas de análisis; la sección 4 contiene los resultados obtenidos; la sección 5 describe brevemente la implicación en el diseño de obras marítimas y, finalmente en la sección 6 se exponen una serie de conclusiones.

2. BASES DE DATOS

Existen dos tipos de fuentes de datos a partir de los cuales se puede obtener la información que se necesita: datos provenientes de medidas instrumentales y datos indirectos o generados

numéricamente. Desafortunadamente, para el caso que nos ocupa, los primeros presentan serios inconvenientes: no existe un registro de datos lo suficientemente largo como para obtener la información requerida, no tienen la homogeneidad espacial necesaria o no han sido sometidas al control de calidad necesario para garantizar que los resultados obtenidos a partir de los mismos puedan ser fiables. Por todo ello se plantea utilizar las series temporales originadas a partir de modelos numéricos, complementándolos con los datos de observaciones. La generación de datos a partir de modelos permite obtener largas series temporales en dominios extensos y con una distribución espacial suficiente para realizar un análisis adecuado. Más aún, si se complementa las bases de observaciones existentes con los datos generados para garantizar la calidad y fiabilidad de los mismos, se puede generar una base de datos homogénea y fiable. Esta aproximación al problema ha sido lo que se ha seguido en este trabajo para generar las bases de datos de partida.

2.1. Datos atmosféricos

Se ha contado con dos tipos de registros de medidas instrumentales: las series temporales registradas por el Instituto Nacional de Meteorología (INM) en sus diferentes estaciones y la Red de Meteorología Portuaria (REMPOR) de Puertos del Estado.

Los datos obtenidos a partir del modelado numérico provienen de la información del proyecto HIPOCAS (EPPE, 2003) que incluye una base de datos con una serie temporal de 44 años de datos de viento a 10 m y presión superficial tanto en la zona del Atlántico como del Mediterráneo. Estos datos se obtienen a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos realizado por el National Centre for Environmental Prediction, Washington, USA (NCEP) y el National Centre for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA (NCAR) y un posterior downscaling dinámico por medio del modelo atmosférico regional REMO (Regional Model) (JACOB y PODZUN, 1997). Estas series temporales numéricas han sido extensamente validadas con datos instrumentales, especialmente boyas meteorológicas y datos de teledetección.

2.2. Datos oceanográficos de oleaje

Se ha recopilado la información instrumental suministrada por Puertos del Estado que incluye su red de boyas de aguas profundas y la red costera. Al igual que en el caso de datos atmosféricos la fuente de datos indirecta proviene del proyecto HIPOCAS, que ha sido configurada, con el fin de generar 44 años (1958-2001) de datos homogéneos de alta resolución de oleaje, haciendo uso del modelo numérico WAM.

2.3. Datos oceanográficos de nivel del mar

Se cuenta con la información histórica de las series temporales registradas por los mareógrafos de la red REDMAR de Puertos del Estado y con los datos numéricos provenientes de la base de datos de HIPOCAS. Los campos de viento y de presión superficial obtenidas a partir del modelo atmosférico REMO, fueron empleados como forzamiento del modelo HAMSOM con la finalidad de generar una base de datos de 44 años de retroanálisis de residuo meteorológico de nivel del mar (a partir de borrascas), en el periodo 1958-2001.

Todas las series numéricas indirectas mencionadas cubren la península ibérica y los archipiélagos, salvo las islas Canarias. La resolución horizontal de estos datos es adecuada para representar, al

menos, los elementos fundamentales de la línea de costa y de la batimetría con resoluciones de 5 a 10 km, dependiendo del área.

La resolución espacial del mallado está entre 0,125-0,25° (mayor resolución para la región del Mediterráneo), para los datos atmosféricos y de oleaje, y de 15'x10', para el nivel del mar. Las resoluciones temporales varían desde una hora para los datos de nivel del mar y 1-3 horas para datos atmosféricos y de oleaje.

2.4. Selección de variables

Se han seleccionado una serie de variables para el estudio de tendencias del régimen extremal dada su representatividad ante las variaciones del clima y su importante relación con las actividades que el hombre desempeña en el litoral:

1. Altura de ola significativa, H_s (m),
2. Velocidad del viento a 10 m. de altura, W (m/s) y,
3. Marea meteorológica, MM (m).

Tras definir las variables de estudio ha sido necesario calibrar H_s y MM para garantizar su fiabilidad desde el punto de vista cuantitativo. Para ello se les ha aplicado una calibración espacio-temporal (TOMÁS *et al.*, 2004) mediante la técnica de funciones empíricas ortogonales (EOF) y el método de optimización SCE-UA (*Shuffle Complex Evolution*), desarrollado por DUAN *et al.* (1992).

Dado que los puntos de mayor interés se encuentran en el litoral se han seleccionado los nodos de las mallas de los modelos WAM y HAMSOM próximos al litoral español (Fig. 1).

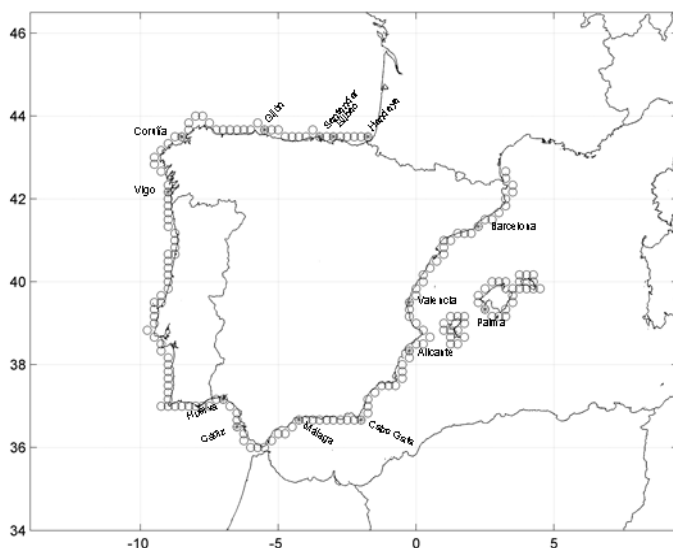


Fig. 1. Localización de los puntos de estudio

3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización del régimen extremal

Para cada punto, se considera una serie de datos de una determinada variable Y , que puede representar cualquiera de las variables geofísicas consideradas, la cual varía en función de X , que en este caso será el tiempo (en principio 1-3 horas).

Para caracterizar el régimen extremal se ha utilizado un método comúnmente usado para el estudio de eventos extremos: el método de Máximos Anuales. Se calculan los valores máximos anuales y se trabaja con esta nueva serie temporal. Es decir, se dispone de una serie de n datos $[(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_n, x_n)]$.

Posteriormente, se ha buscado la distribución teórica de valores extremos que aporte un ajuste óptimo. Se ha seleccionado la distribución de Gumbel de máximos (o distribución Fisher-Tippet tipo I). Esta distribución es adecuada con variables aleatorias distribuidas idénticamente e independientes y es ampliamente utilizada para caracterizar regímenes extremos de variables geofísicas oceanográficas. La distribución de Gumbel de máximos es una función bi-paramétrica que presenta un parámetro de localización, λ , y un parámetro de escala, δ . Su función de distribución es:

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

Asumiendo que la función de distribución viene definida por: $F = F(y; \lambda, \delta)$, la ecuación puede describirse mediante la forma de regresión lineal: $X(y) = a(\lambda, \delta)Y(F) + b(\lambda, \delta)$, donde: $X = -\ln[-\ln(F(y))]$, $Y = y$.

Para calcular la función de distribución acumulada de los datos se consideró la expresión de GRINGORTEN (1963): $F(y_m) = (n - 0.44)/(N + 12)$, donde n es el índice de orden de dato y N el número total de datos. La estimación de los parámetros a y b ($a = 1/\delta$, $b = -\lambda/\delta$) se estimó mediante el método de mínimos cuadrados a la mejor recta de ajuste en el papel probabilístico de Gumbel de máximos. En la figura 2 se muestra un ejemplo del procedimiento explicado:

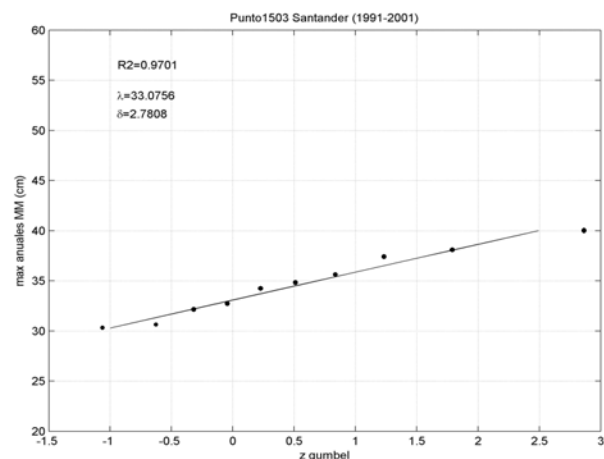


Fig. 2. Ejemplo de ajuste de Gumbel para un intervalo de 10 años

3.2. Tendencias en régimen extremal

Para el estudio de tendencias del régimen extremal en cada punto se ha seguido la metodología de VIKEBO *et al.* (2003), que consiste en trabajar con la serie de datos de 44 años realizando el análisis de máximos anuales a intervalos de tiempo de 10 años. La selección de este intervalo se ha realizado en función de su sensibilidad a las variaciones temporales climatológicas que nos interesan. Esta metodología permite llevar a cabo el análisis de tendencias considerando las variaciones temporales. En la figura 3 se muestra un esquema del procedimiento seguido.

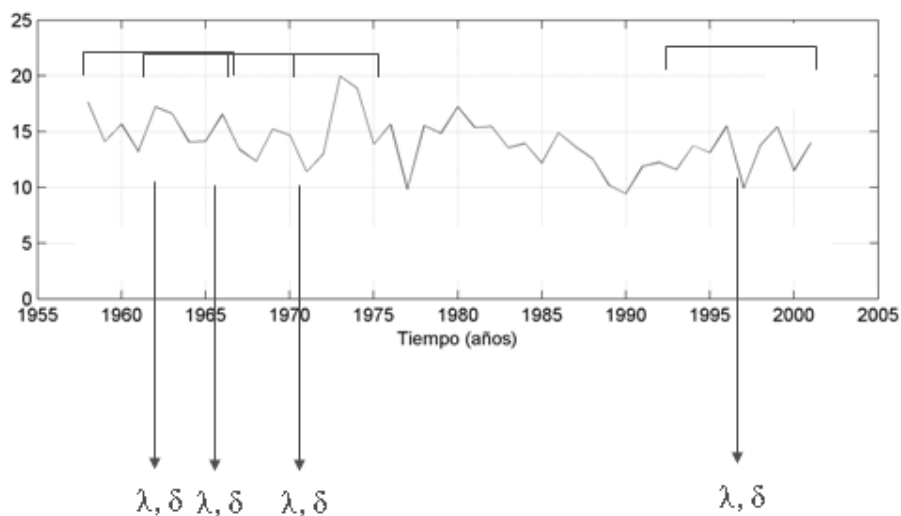


Fig. 3. Esquema de análisis de máximos anuales a intervalos de 10 años

Se ha considerado relevante realizar el análisis de tendencias sobre dos tipos de parámetros de las variables Y consideradas siguiendo la metodología de VIKEBO *et al.* (2003). Por una parte la serie de datos obtenida a partir del análisis de máximos anuales a intervalos de tiempo de 10 años y por otro lado la serie de datos asociada al valor Y de periodo de retorno de 100 años, Y_{100} . El cálculo de Y_{100} se obtiene a través del cálculo de los valores de retorno de la función de distribución de Gumbel:

$$Y_{100} = \lambda - \delta \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{100} \right) \right]$$

La metodología para realizar el análisis de tendencias seguida es la siguiente: primeramente se hace una regresión lineal, con mínimos cuadrados, de manera que se ajustan los datos a la recta que minimiza $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, siendo y_i el valor dato de la serie en x_i e \hat{y}_i el valor estimado de y_i , con la recta de ajuste, para x_i : $\hat{y}_i = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_i$, siendo los valores de \hat{a}_0 y \hat{a}_1 los estimadores de a_0 y a_1 , que son los parámetros que definen la recta de ajuste ($y_i = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i$).

Posteriormente, para tener la seguridad de que la serie de datos ajustada no tiene algún valor anómalo o incorrecto se realiza una prueba de localización de *outliers* (BARNET y LEWIS, 1994). Si no existe ningún *outlier*, se deja el primer ajuste realizado; si por el contrario se detecta la presencia de algún *outlier* se elimina de la serie y se realiza un segundo ajuste con la nueva serie de datos (sin *outlier*). Una vez que se tiene el resultado del ajuste de la serie de datos, se trata de interpretar si es significativa la tendencia que sigue en el tiempo, para ello se definen los intervalos de confianza.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis puntual de tendencias en régimen extremal

Debido a los distintos factores que caracterizan a cada variable los resultados del análisis temporal de tendencias varían. La evolución temporal para el caso de *MM* aporta resultados menos acusados con respecto al análisis de *Hs* y *W*. Así, resultan tendencias en los parámetros de ajuste λ y δ de la *MM* con menor variación y la pendiente resultante de la línea de regresión de tendencia también es menor. La *Hs* y *W* muestran series temporales con mayor variación, lo que suele provocar pendientes de tendencia más acusadas y variaciones en los parámetros de ajuste mayores a lo largo del tiempo.

Para el caso de *MM* resulta, para todos los casos, una tendencia negativa en la serie de máximos anuales y, a nivel global, una tendencia positiva en MM_{100} . Sin embargo esta tendencia positiva es más suave que la contraria observada para la serie de máximos anuales. Para el litoral Oeste gallego esta tendencia positiva se amplifica.

Los resultados del análisis para velocidad del viento y altura de ola indican estacionariedad para la tendencia de máximos anuales y series temporales de W_{100} y H_{100} con importantes variaciones anuales. Una característica destacable es la tendencia general positiva para las tres variables de estudio a partir de la década de los ochenta, exceptuando el litoral cantábrico oriental.

En la figura 4 se muestra, para el nodo del “Delta del Ebro”, el análisis de tendencia del régimen extremal de altura de ola significativa, marea meteorológica y velocidad del viento. En el panel se muestra el valor máximo anual (*) y el valor extrapolado correspondiente al período de retorno de 100 años (o) utilizando los parámetros obtenidos anteriormente. La tendencia para H_{100} muestra una disminución significativa de dicho parámetro en estos últimos 40 años, mientras que para MM_{100} y W_{100} las tendencias son positivas.

Es importante mencionar que las tendencias resultantes para la serie temporal de máximos anuales no tienen porqué presentar similitud, ni en magnitud ni en signo, con las tendencias de la variable de periodo retorno de 100 años asociada (Y_{100}). Este hecho se debe a la dispersión de la serie temporal de máximos anuales con respecto a la media de la misma serie. Conjuntamente, valores altos de la serie de máximos anuales tienen más peso que valores de pequeña magnitud en el cálculo de la Y_{100} . De ahí que un aumento en la dispersión de la serie de máximos anuales por encima de la media contribuya a incrementar la pendiente de la línea de regresión de tendencias de Y_{100} .

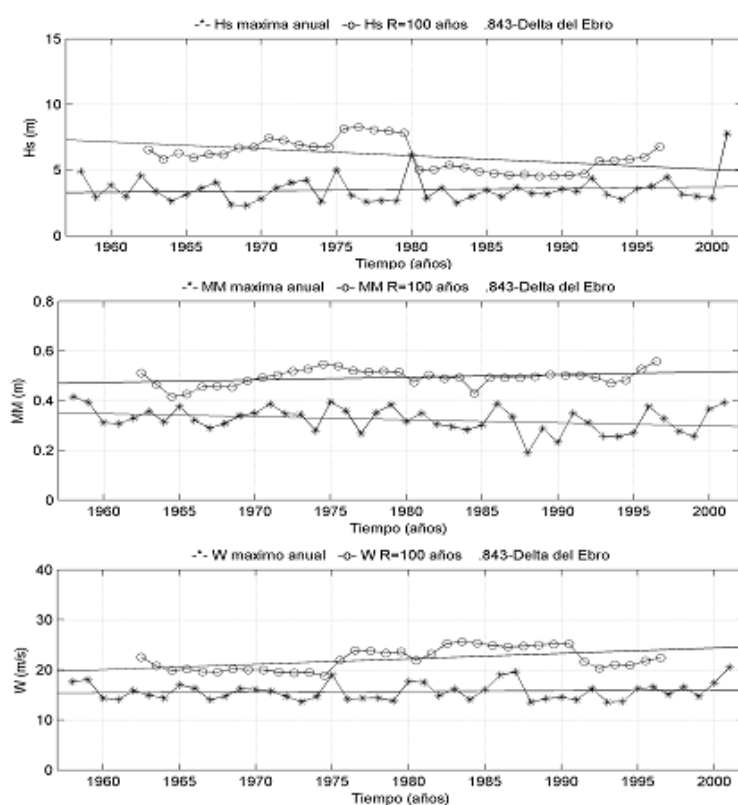


Fig. 4. Variación del régimen extremal de Altura de ola significativa, marea meteorológica y velocidad del viento en el Nodo “Delta del Ebro”

4.2. Análisis espacial de tendencias en régimen extremal

El análisis espacial de la variación de los datos permite determinar las variaciones de las tendencias obtenidas a lo largo del litoral. Esta tarea permite la zonificación del litoral a efectos de la caracterización del clima marítimo. Se manifiestan variaciones espaciales en las tendencias con características comunes para los resultados de régimen extremal de oleaje y de viento. La zonificación de tendencias del régimen extremal de *MM* presenta variaciones espaciales a mayor escala que en el caso de las variables *Hs* y *W*. Asimismo, se observan resultados similares, en magnitud y signo, para la tendencia climatológica de la *MM* de las vertientes Sur y Este peninsular.

Se detecta un cambio en la caracterización de la evolución del clima marítimo (para las tres variables seleccionadas) en el análisis de tendencias extremales (Y_{100}) en torno a cabo de Gata. Este punto singular presenta un régimen de vientos dominado por dos direcciones predominantes (levante y poniente) y la influencia marítima de dos masas giratorias anticiclónicas definidas por el frente Almería-Orán. Por ello, los cambios climatológicos en alguna de estas direcciones dan lugar a que en esta zona se produzca una discontinuidad en las tendencias evolutivas del clima marítimo. Por otro lado, existe una zonificación lateral Noreste-Sureste en las islas Baleares en las tendencias extremales para todas las variables analizadas, lo que implica un debilitamiento en la parte Este y mayor severidad del clima en la parte Oeste de las islas. Las variaciones del régimen extremal de oleaje indican una importante disminución en Cataluña y en la zona de cabo de la Nao.

En la figura 5 se presenta, a modo de ejemplo, la evolución espacial de tendencias en el litoral oriental de la península para las variables de estudio:

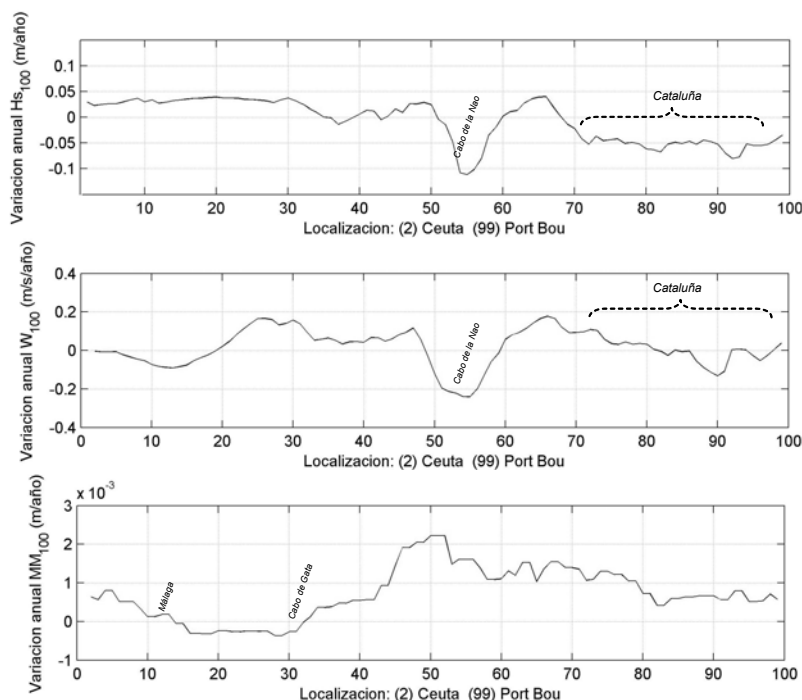


Fig. 5. Variación espacial de tendencias del régimen extremal de H_s , W y MM en el litoral oriental de la Península Ibérica

5. CONSECUENCIAS EN EL DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS

El diseño de una obra marítima requiere la definición correcta del oleaje al que va a estar sometida durante su vida útil, el cual se denomina temporal de cálculo. Actualmente dicho temporal de cálculo se obtiene a partir del régimen extremal del oleaje, sin atender a la duración del temporal, a la secuencia de olas o a la variación del clima marítimo por efecto del cambio climático. Sin embargo el comportamiento de las obras marítimas (playas, puertos, espigones, etc.) depende de la historia completa de acciones sobre la totalidad de su vida útil; esto es, de cómo sea la evolución temporal del clima marítimo que afecta a la obra. Sería deseable, por tanto, el diseño de las obras marítimas teniendo en cuenta factores como la duración de los temporales o su evolución a lo largo del tiempo. Es importante señalar que hoy en día no se debe descuidar en el diseño de toda obra marítima el efecto del cambio climático (ascenso del nivel medio del mar y variación del régimen de oleaje), analizando tanto las tendencias de parámetros de régimen medio como las posibles tendencias del régimen extremal. Ello redundaría en un diseño más ajustado de estas estructuras y un beneficio económico importante, tanto para el diseño de estructuras de protección como de playas. Nótese que una reducción de un 10% en la altura de ola de cálculo produciría un ahorro de hasta el 30% en una obra de abrigo y que, para los próximos años, se están proyectando ampliaciones para los principales puertos comerciales de España con presupuestos de cientos de millones de euros.

Para demostrar la importancia de la variación climática en el tiempo en el diseño de una obra, se plantea el cálculo de estabilidad de una dique de protección en talud. A modo de ejemplo, para un

dique de piezas cúbicas de hormigón, el cálculo del peso de las piezas del manto principal (W) a partir de la formulación de LOSADA y GIMÉNEZ-CURTO (1979) viene dado por la expresión:

$$W = \gamma_w H_i^3 \frac{S_r}{(s_r - 1)^3} \psi$$

donde: γ_w = peso específico del agua de mar, $S_r = \gamma_s / \gamma_w$, γ_s = peso específico del hormigón, ψ = función de estabilidad y H_i = altura de ola de cálculo.

Como se observa existe una relación entre altura de ola de cálculo, H_i , y peso de la pieza, W , de tercer grado. Si consideramos el cambio climático en la altura de ola de cálculo y el resto de parámetros constantes en el tiempo, ésta variará: $H_i = H_i + \Delta H_i$, lo que implica un cambio en el peso de la pieza: $W = W + \Delta W$, que vendrá descrito a partir de la expresión:

$$\Delta W = \gamma_w \frac{S_r}{(s_r - 1)^3} \psi 3H_i^2 \Delta H_i$$

Considerando el dique de talud 2:1 y los parámetros de cálculo: $H_i=7,5\text{m.}$, $\psi=0,047$, $\rho_w=1025\text{ kg/m}^3$, $\rho_s=2300\text{ kg/m}^3$ y una *vida útil* de 20 años, mediante el método de cálculo actual, se obtiene un $W=24\text{ ton.}$ Sin embargo, si consideramos las tendencias climáticas de $\pm 0,02\text{ m/año}$ en la altura de diseño, se obtiene un $\Delta W \approx \pm 4\text{ ton.}$ al final de la vida útil de diseño. Nótese, por tanto, la fuerte influencia que puede tener en el diseño de obras marítimas las variaciones hiperanuales del régimen extremal de oleaje.

6. CONCLUSIONES

El análisis de tendencias del régimen extremal de oleaje, empleando la base de datos HIPOCAS ya calibrada, ha resultado adecuado para este estudio, puesto que es una base de datos extensa, los datos de partida han sido validados y cubren las necesidades de este estudio.

Se verifica la importancia de la influencia del cambio climático en la caracterización de los eventos extremos. Los resultados indican muy pocas zonas del litoral español que no presenten tendencia para alguna de las variables seleccionadas. Es significativa la variación espacial como temporal de la tendencia de marea meteorológica, altura de ola y velocidad del viento. Asimismo, se verifica la relación existente entre estos dos últimos parámetros.

La incorporación de la variación del clima marítimo por efecto del cambio climático, tanto en el diseño de estructuras de protección marítimas como de playas, puede dar lugar a un mejor diseño de estas estructuras y un beneficio económico importante.

El análisis espacial de tendencias para el régimen extremal de la marea meteorológica durante el periodo 1958-2001 indica una tendencia positiva en el tiempo para el nivel del mar en el litoral mediterráneo español. Lamentablemente, se han realizado pocos estudios sobre la influencia del cambio climático en el Mar Mediterráneo. Esta tendencia positiva de las variaciones del nivel del mar en el litoral español parece opuesta, a priori, a las conclusiones del proyecto STOWASUS, que detecta un pequeño debilitamiento de la MM_{100} en el Mar Adriático y disminución de la severidad de las depresiones mediterráneas ante un escenario de aumento CO_2 atmosférico.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Oficina Española de Cambio Climático la financiación (Ministerio de Medio Ambiente) por el proyecto “Investigación sobre impactos en la costa española por efecto del cambio climático”. Así mismo, se agradece al Ente Público Puertos del Estado (Ministerio de Fomento), por el uso de la base de datos HIPOCAS y de todas sus redes de medida instrumental de boyas de oleaje, mareógrafos y estaciones meteorológicas. F.J.M. agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología la financiación dentro del programa Ramón y Cajal.

8. REFERENCIAS

- BROMIRSKI *et al.* (2003). “Storminess variability along de California coast: 1858-2000”. *Journal of Climate*, vol. 16, 6, pp. 982-993.
- BARNETT, V. and LEWIS, T. (1994). *Outliers in Statistical Data*. Hardcover.
- DUAN, Q. *et al.* (1994). “Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models”. *Journal of Hydrology*, 158, pp. 265-284.
- EPPE (2003). *Reanálisis de 44 años (1958-2001) del clima oceánico y atmosférico en el Mar Mediterráneo: Informe Técnico de la contribución de Puertos del Estado al proyecto europeo HIPOCAS*. 305 pp.
- EPPE. *Recomendaciones para Obras Marítimas. ROM 0.0, ROM 0.3-91, ROM 0.4-95*. Ministerio de Fomento, Puertos del Estado.
- GREVEMEYER, I.R HERBERT and ESSEN, H.H. (2000). “Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic Ocean”. *Nature*, 408, pp. 349-352.
- GRINGORTEN, I.I. (1963). “A plotting rule for extreme probability paper”. *Journal of Geophysical Research*,. 68(3), pp. 813-814.
- HURRELL, J.W. (1995). “Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation Regional Temperatures and Precipitation”. *Science*, 269, pp. 676-679.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Third Assessment Report*. On line: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/.
- JACOB, D. and PODZUN, R. (1997). “Sensitivity studies with the regional climate model REMO”. *Meteorol. At-mos. Phys.*, 63(1-2), pp. 119-129.
- E.KAAS *et al.* *Regional Storm, wave and surge scenarios for the 2100 century. Synthesis of STOWASUS-2100. Final report*.
- LOSADA, M.A. and GIMÉNEZ-CURTO, L.A. (1979). *Coastal Engineering*, 3, pp. 77-96.
- MASSEL, S.R. (1996). “Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction”. *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 11.
- MENDEZ, F. *et al.* (2004). Estudio de los impactos en la costa española por el efecto del cambio climático. En: *IV Congreso de la Asociación Española de Climatología (AEC)*.
- SMITH, R.L (1994). “Spatial modelling of rainfall data”. *Statistics for the Environment*, vol. 2 V. Barnett & F.Turkman, editors.
- TOMÁS, A. *et al.* (2004). Bases de datos de oleaje y nivel del mar, calibración y análisis: El cambio climático en la dinámica marina en España. En: *IV Congreso de la Asociación Española de Climatología (AEC)*.
- VIKEBO, F. *et al.* (2003). “Wave height variations in the North Sea and on the Norwegian Continental Shelf, 1881-1992”. *Continental Shelf Research*, 23, pp. 251-263.
- VON STORCH, H. and ZWIERS, Z.W. (2001). *Statistical Analysis in Climate Research*. University Press, Cambridge.
- WASA GROUP (1998). “Changing waves and storms in the Northeast Atlantic”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (5), pp. 741-760.

