

EVALUACIÓN GLOBAL DE LAS CONDICIONES EXTREMAS DEL OLEAJE ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Melisa MENENDEZ, Héctor LOBETO

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria

menendezm@unican.es, lobetoh@unican.es

RESUMEN

El clima del oleaje puede verse afectado por el cambio climático, ya que ciertas variables directamente vinculadas a la generación y propagación del mismo (cobertura de hielo marino, viento sobre el mar) se están viendo alteradas por el calentamiento global del planeta. En este sentido, el estudio de posibles cambios futuros en las condiciones del oleaje extremo (temporales marítimos) son de especial interés, ya que pueden causar impactos relevantes en la navegación, así como en la erosión e inundación costera. Este estudio analiza cambios que pueden ocurrir en el oleaje extremal ante escenarios de cambio climático para el fin del siglo XXI. Para ello se ha elaborado, en primer lugar, una base de datos global multi-modelo de proyecciones climáticas del oleaje. Posteriormente, se ha evaluado la calidad de las simulaciones climáticas mediante la comparativa con datos históricos y se ha aplicado una corrección del sesgo, con especial atención a la cola superior de la distribución. Las series horarias resultantes de la variable altura de ola significativa han sido utilizadas para caracterizar los valores extremos asociados a ciertos periodos de retorno. Finalmente, se han analizado los cambios detectados en estos eventos extremos, así como las diferencias con respecto a las condiciones medias del oleaje. Aunque ciertos patrones de cambio del oleaje medio se mantienen para los extremos, se han localizado regiones donde las condiciones extremas serán más severas a pesar de que las proyecciones indican un descenso en el clima medio.

Palabras clave: clima marino, oleaje, extremos, temporal, cambio climático, escenarios

ABSTRACT

The wave climate may be affected by climate change, as certain variables directly linked to the generation and propagation of waves (marine sea ice coverage and wind) may be altered by the global warming. In this sense, the study of possible future changes in extreme wave conditions (sea storms) are of special interest, as they can cause relevant impacts on navigation, as well as on coastal erosion and flooding. This study analyses changes that may occur in extreme waves under climate change scenarios for the end of the 21st century. To this end, a global multi-model database of climate projections of waves has been developed. The quality of the climate simulations has been then assessed, by comparison with historical data, and a bias correction has been applied, with special focus on the upper tail of the probability distribution. The resulting hourly time series of the significant wave height variable

have been used to characterize the extreme values associated with return periods. Finally, the changes detected in these extreme events have been analyzed, as well as the differences with respect to the mean wave conditions. Although certain patterns of mean wave change are also observed for the extreme wave conditions, regions of more severe wave storms, even though projections indicate a decrease in mean climate, are detected.

Key words: marine climate, wind-waves, extremes, wave storm, climate change, scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

Los cambios en el clima del oleaje sobre los océanos, y especialmente en los extremos o ante temporales marítimos, pueden tener un efecto significativo en las actividades marítimas, como la navegación y la industria de alta mar. Estos cambios combinados con los de otras dinámicas marinas también afectadas por el calentamiento global (como la subida del nivel medio del mar) pueden tener un impacto relevante en procesos costeros, como la erosión (Toimil et al. 2020) y las inundaciones (ej. Dodet et al, 2019 y Melet et al. 2020). El cambio climático puede afectar al clima del oleaje a través de la alteración de variables directamente relacionadas con su generación y propagación. Las futuras variaciones en los campos de vientos marino superficiales y la cobertura de hielo pueden alterar el comportamiento de las olas del viento sobre los océanos, cambiando la energía transmitida (Reguero et al. 2019) y las áreas de generación de los oleajes de fondo (Thomson y Rogers, 2014).

Varios estudios han ido abordando el análisis de los futuros cambios en el clima de las olas, generalmente a través de proyecciones climáticas de las olas. Dado que los modelos de circulación general climáticos no simulan el oleaje (ondas de gravedad generadas por el viento), las proyecciones del clima de las olas se generan a partir de los resultados de ciertas variables disponibles en estos modelos climáticos globales. Actualmente, se plantean dos aproximaciones para obtener proyecciones climáticas de olas, tanto a escala regional como global. Por un lado, el denominado método dinámico (ej. Dobrynin et al. 2012; Lemos et al. 2019; Hemer et al. 2013; Mori et al. 2013), y por otro lado métodos matemático-estadísticos (ej. Wang et al. 2014; Camus et al. 2017). La aproximación dinámica consiste principalmente en la realización de simulaciones numéricas que resuelven las ecuaciones de gobierno de la variable objetivo mediante empleo de modelos de oleaje de tercera generación. La aproximación estadística en cambio emplea relaciones matemáticas entre posibles variables predictoras de las situaciones meteorológicas que generan el oleaje (por ejemplo, los campos espaciales de los gradientes de presión atmosférica) para resolver ciertos parámetros del oleaje, como la altura de ola.

La comunidad científica internacional, principalmente a través de la iniciativa COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project) está realizando notables esfuerzos para integrar los estudios globales existentes sobre los futuros cambios en el clima de las olas y evaluar su solidez e incertidumbres (Hemer et al. 2013; Morin et al. 2018; Morin et al. 2019). Los resultados obtenidos en estos estudios evidencian un consenso sobre el futuro aumento de la altura media del oleaje sobre el Océano

Austral y Pacífico oriental tropical, así como una disminución en el Atlántico Norte y el Pacífico noroccidental. El análisis de los cambios futuros en el clima de las olas extremas bajo escenarios de cambio climático es limitado requiere estudios más específicos. Hasta la fecha, la evaluación de las variaciones futuras de las olas extremas se ha llevado a cabo principalmente a través del análisis de altos cuantiles estimados a partir de series temporales de la altura del oleaje con una resolución superior a la diaria (por ej. Wang et al. 2004 y Shope et al. 2016) o mediante el estudio del comportamiento de los máximos anuales (ej. Casas-Prat et al. 2018, Bricheno y Wolf, 2018). Un análisis preciso de los fenómenos extremos climáticos con una probabilidad de ocurrencia muy baja sin embargo requiere el análisis estadístico a partir de la teoría de valores extremos. Esta teoría engloba diferentes modelos estadísticos que proporcionan distribuciones asintóticas a largo plazo para los extremos. Además, permite obtener cuantiles con muy poca probabilidad de ocurrencia, asociados a periodos de retorno (Coles et al., 2001). Los estudios sobre este tema son todavía muy limitados. Este hecho, combinado con la complejidad intrínseca para caracterizar los temporales marítimos, hace que actualmente sea difícil alcanzar un consenso sólido sobre los cambios regionales previstos para finales de siglo. Este estudio se centra en el análisis de los oleajes más extremos mediante la evaluación de los cambios proyectados para diferentes periodos de retorno y para dos escenarios de cambio climático, analizando su magnitud, incertidumbre, distribución geográfica y su comportamiento con respecto a las condiciones de oleaje medio.

2. DATOS DE PROYECCIONES DE OLAJE

En este estudio se ha generado una base de datos de proyecciones climáticas de oleaje a escala global. Para ello, se han llevado a cabo diferentes simulaciones dinámicas de olas utilizando los vientos sobre la superficie del mar y los resultados de la cobertura de hielo marino procedentes de diversos modelos climáticos globales (GCMs) para generar un conjunto climático de olas multi-modelo, que consta de siete miembros. El modelo de oleaje utilizado es el WaveWatchIII (WW3), en su versión 4.18 (Tolman, 2014). Las principales características del esquema numérico utilizado en este estudio consisten en: la utilización del término fuente test45 (Ardhuin et al. 2010), que simula los procesos de disipación de la energía del oleaje durante su generación, un tratamiento continuo de la concentración de hielo sobre la superficie oceánica, rotura del oleaje en función de la profundidad, la fricción del fondo oceánico sobre el oleaje, la reflexión del oleaje cuándo alcanza la costa, y la reducción de la energía del oleaje durante su propagación debido a obstáculos de menor escala espacial que el tamaño de las celdas de cálculo del modelo (por ejemplo, pequeñas islas).

Para realizar este estudio se ha utilizado la información de GCMs procedentes del CMIP5 (Taylor et al. 2012). El criterio utilizado para seleccionar los GCMs se basa en la necesidad de producir series temporales horarias de parámetros del oleaje (para caracterizar las alturas de ola máximas durante los temporales). Los GCM por tanto deben proporcionar vientos superficiales y campos de cobertura de hielo marino con la máxima resolución temporal posible. Finalmente, siete modelos de circulación general atmósfera-océano han sido seleccionados. Estos se describen en la tabla 1.

GCM	Institución	Resolución atmosférica (lat x lon)
MIROC5	MIROC (Japón)	1,40° x 1,40°
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace (Francia)	1,25° x 1,25°
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (EEUU)	2,00° x 2,50°
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (Francia)	1,40° x 1,40°
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italia)	0,75° x 0,75°
ACCESS1.0	CSIRO-BOM (Australia)	1,25° x 1,90°
HADGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	1,25° x 1,90°

Tabla 1: Características de los GCMs utilizados

La base de datos generada proporciona proyecciones de oleaje con cobertura global. Se han analizado las series temporales horarias del parámetro altura de ola significativa (Hs), con una resolución espacial de un grado. Aquellos nodos del dominio numérico con menos del 60% de los datos horarios disponible, debido a la presencia de hielo no se han considerado en el estudio.

El presente estudio se centra en los cambios estimados a finales de siglo con respecto al clima presente, comparando un periodo histórico de referencia climática (1986-2005) con el tramo temporal futuro 2081-2100, bajo dos escenarios de emisiones de GEI: RCP4.5 y RCP8.5. Los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 son dos trayectorias de concentración representativas, contempladas en el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5, Cubasch et al. 2013). Representan trayectorias de emisión de GEI con un forzamiento radiativo previsto de 4,5 Wm⁻² y 8,5 Wm⁻² para el horizonte 2100, respectivamente. El escenario RCP8.5 es representativo de los escenarios que conducen a altos niveles de GEI, mientras que el RCP4.5 comprende escenarios de estabilización antes de 2100 mediante el empleo de una serie de tecnologías y estrategias de adaptación.

3. MÉTODOS

3.1. Corrección del sesgo

Aunque los GCMs tienen la capacidad de reproducir el sistema climático y las interconexiones entre sus componentes, algunas cuestiones como la resolución espacial y las simplificaciones introducidas por las parametrizaciones numéricas de algunos procesos físicos causan un sesgo sistemático inherente a cada modelo (Maraun et al. 2017). Estos sesgos se transmiten a la variable climática del oleaje, principalmente debido a los sesgos en los campos de viento de la superficie del mar. La corrección de este sesgo se ha aplicado de forma común sobre variables meteorológicas e hidrológicas en estudios climáticos. Recientemente, Lemos et al. (2020) aplican esta corrección también al oleaje. Sus resultados de los datos corregidos muestran una señal de cambio inalterada (es decir, se conserva la

variabilidad climática) y una posible disminución de la incertidumbre de los cambios proyectados. Estos precedentes, junto con el hecho de que los eventos extremos son los que presentan los mayores sesgos, justifican la evaluación de posibles sesgos y su corrección para evaluar cambios en los temporales marítimos.

Por ello, hemos aplicado una técnica de corrección para reducir los sesgos de cada miembro de las proyecciones globales del oleaje durante el periodo de referencia 1986-2005, para luego extrapolar la corrección al tramo de tiempo futuro. La base de datos histórica de referencia utilizada para la corrección es el hindcast de oleaje global GOW2 (Perez et al. 2017). La técnica empleada consiste en la corrección de los cuantiles de la distribución de la variable Hs. Se suele denominar mapeo de cuantiles empíricos (EQM por sus siglas en inglés). En este estudio hemos modificado ligeramente el método para corregir mejor la cola superior de la distribución.

EQM consiste en ajustar la función de distribución acumulativa (CDF) empírica de cada simulación climática a la CDF empírica de los datos históricos de referencia. Así, se obtiene un rango numérico corrector (X_{corr}) para cada cuantil seleccionado, para posteriormente aplicar una interpolación lineal entre ellos. La corrección fuera del rango definido por los cuantiles seleccionados es la misma que la aplicada al primer o al último cuantil, respectivamente. La selección de los cuantiles juega un papel importante en el desempeño adecuado del método. Las probabilidades de los cuantiles seleccionados (q_i) se han definido de la siguiente manera:

- Se define la secuencia desde el cuantil 0,01 (q_{01}) seguido de cuantiles linealmente distribuidos desde el q_{05} hasta el q_{90} , con un incremento cada 0,05.
- Se amplían los cuantiles seleccionados desde el q_{90} a doce cuantiles más, escalados según la distribución de Gumbel para una mejor representación de la cola superior de la distribución.

Finalmente, hemos evaluado la calidad de las simulaciones antes y después de aplicar esta corrección a través de la métrica PDF-based skill score (Perkins et al. 2007). La evaluación ha sido satisfactoria.

3.2. Modelo estadístico de extremos

El modelo estadístico empleado para estimar valores de Hs asociados a diferentes periodos de retorno se basa en la teoría asintótica de valores extremos a partir de una selección de los máximos de la variable objetivo. En concreto, se han seleccionado los máximos anuales a partir de las series temporales horarias. Para cada miembro y periodo temporal de 20 años se han ajustado los correspondientes máximos anuales a la distribución generalizada de valores extremos (GEVD; Coles et al. 2001). La GEVD representa una familia de distribución a partir de tres parámetros estadísticos: el parámetro de localización, el parámetro de escala y el parámetro de forma. Este último es un indicador del comportamiento de la cola superior de la distribución. El parámetro de forma de la GEVD condiciona por tanto la estimación de altos periodos de retorno. Por ello, se ha evaluado tanto su signo como su significancia a partir de la base de datos histórica GOW2, utilizada para corregir el sesgo de las simulaciones climáticas.

Se han observado valores positivos de este parámetro (es decir, distribución de cola pesada) en las regiones en las que el oleaje extremo está dominado por la actividad de los ciclones tropicales (i.e. Mar Caribe, Pacífico Occidental, Océano Índico

Sudoccidental) y valores próximos a cero o negativos en el resto de las regiones (figura 1). No obstante, la baja proporción del océano global que muestra un ajuste estadísticamente significativo y un cambio futuro sólido en el parámetro de forma GEV (14 % y 16 %, respectivamente) indica una inestabilidad subyacente al agregar este grado de libertad en el modelo estadístico. Por ello, se decide ajustar los máximos anuales a la familia de la GEVD bi-paramétrica, generalmente denominada distribución de Gumbel o distribución de extremos tipo I. El uso de este modelo más simple ofrece una mayor solidez general, aunque puede dar lugar a una subestimación de las distribuciones de colas pesadas en las áreas de actividad de los ciclones tropicales.

3.3. Validación de los resultados

El método empleado para estimar valores de Hs asociados a altos periodos de retorno ha sido validado mediante comparación con los periodos de retorno obtenidos de registros in-situ (i.e. datos medidos por boyas de oleaje). El conjunto de datos de boyas utilizado para llevar a cabo la validación se obtiene del servicio marino europeo Copernicus. Finalmente, los registros procedentes de cincuenta y dos boyas cumplen unos mínimos requisitos para comparación con los datos de estudio. La comparativa de las estimaciones para los periodos de retorno de 5, 20 y 50 años de las boyas frente a las simulaciones climáticas indica un error relativo medio de 13%, 18% y 20%, respectivamente.

3.4. Incertidumbre en el cambio estimado

La evaluación de la incertidumbre de los cambios proyectados se basa en un método propuesto en el informe AR5 del IPCC (Collins et al., 2013). En particular, se aborda la robustez del cambio considerando, primero, su significancia estadística y, luego la concordancia en el signo del cambio entre los miembros del *ensemble*. Se consideran robustos, y se muestran punteados en los mapas, los nodos de la cuadrícula en los que el cambio es estadísticamente significativo al 95 % de nivel de confianza en más del 50 % de los miembros del Ensemble, y a su vez, al menos el 80% de ellos coinciden en el signo del cambio. Si no se cumplen ambas condiciones, los nodos de la cuadrícula no se puntean.

3. RESULTADOS

En la figura 1 se muestra la distribución regional de los parámetros de la GEVD estimados para el clima del oleaje durante el clima presente, así como los cambios futuros proyectados para finales de siglo bajo el escenario RCP8.5. El parámetro de localización, un indicador de los valores centrales de la distribución, aumenta con la latitud hasta alcanzar sus mayores valores en la región extra-tropical y, en particular, en el Océano Atlántico Norte, donde alcanza valores de Hs cercanos a los 14 metros. Los cambios proyectados de descenso del oleaje en el hemisferio norte consensuados por la comunidad COWCLIP coinciden con la disminución obtenida de este parámetro, que muestra disminuciones locales cercanas a 1m en el Océano Atlántico Norte y en torno al archipiélago japonés. También se obtiene un cambio proyectado robusto a aumento en el Océano Austral. La distribución espacial del parámetro de

escala es bastante similar a la del parámetro de localización (es decir, valores más altos en latitudes más altas), aunque muestra algunas diferencias relevantes, como valores elevados en la región de Japón. En cuanto a los cambios futuros, se puede observar un mayor ruido en el signo del cambio, lo que dificulta alcanzar otras conclusiones generales consistentes más allá de un aumento en el Océano Austral. No obstante, se pueden señalar algunos aspectos relevantes como la fuerte disminución encontrada en el Océano Índico tropical del sureste y la pérdida de un claro patrón de cambio decreciente en el Océano Atlántico Norte.

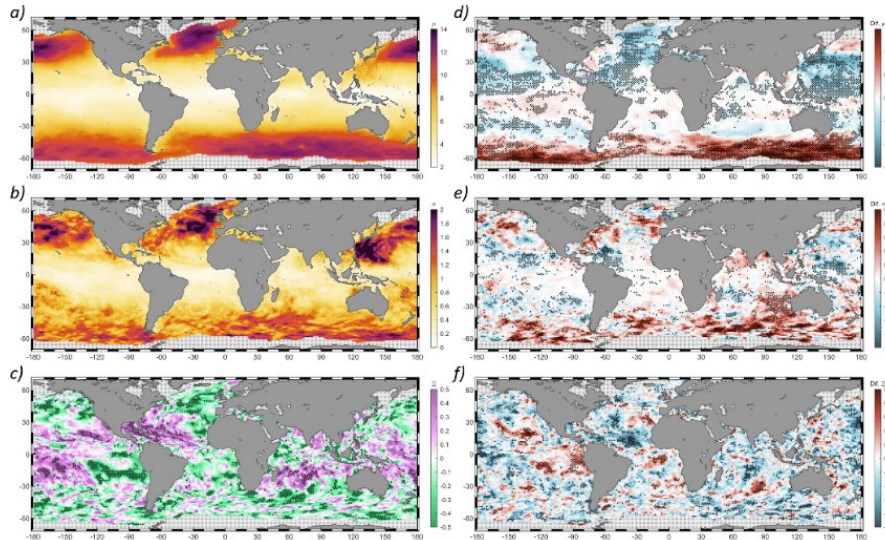


Fig. 1: Parámetros de localización (a), escala (b) y forma (c) de la GEVD estimados a partir de los datos procedentes del hindcast histórico GOW2. Los cambios (2081-2100 frente a 1986-2005) obtenidos del ensemble de siete miembros se muestran en los paneles (d), (e) y (f), para los parámetros de localización, escala y forma, respectivamente.

A partir del modelo estadístico seleccionado se han estimado los valores de Hs asociados a los periodos de retorno de 5, 20, 50 y 100 años (H5, H20, H50 y H100), tanto para el periodo de referencia asociado al clima presente como para los 2 escenarios futuros a fin de siglo. Los patrones regionales espaciales encontrados en la magnitud de estos valores extremos resultan muy similares para los diferentes periodos de retorno. Por ello, en la figura 2a se muestra el valor asociado a la Hs de 20 años de periodo de retorno. El gradiente creciente de Hs desde el ecuador hacia latitudes más altas alcanza su máximo en las regiones más septentrionales del Atlántico y Pacífico, mostrando magnitudes superiores a 19 m y 22 m para los periodos de retorno de 20 y 100 años respectivamente, respectivamente. Del mismo modo, el Océano Austral es una región altamente energética que presenta valores de hasta 17 m y 20 m para H20 y H100 en el Océano Índico sur. Las altas magnitudes observadas en la región extra-tropical se extienden a las áreas de actividad de ciclones tropicales (por ejemplo, Atlántico nororiental tropical, Pacífico nororiental tropical o Pacífico sudoriental tropical).

La distribución espacial de los cambios proyectados también resulta en patrones espaciales muy similares para diferentes periodos de retorno, aunque muestra una

incertidumbre creciente para los periodos de retorno mayores. Se puede distinguir un patrón geográfico claro caracterizado por un aumento general esperado en los extremos de las olas en el Océano Austral y una disminución en el Hemisferio Norte, presentando también excepciones menores como el Pacífico más septentrional y el Atlántico noroccidental. La región tropical del sur, sin embargo, muestra un patrón de cambio heterogéneo en el que se pueden observar tendencias tanto negativas como positivas. Por lo tanto, se propone una regionalización del océano global para comprender mejor los cambios futuros bajo los escenarios de cambio climático y su incertidumbre (figura 2b). Los cambios futuros estimados en H20 s bajo el escenario RCP8.5 muestran un fuerte aumento de un 34% del Océano Austral, con una mayor incertidumbre en la región del Atlántico sur (de 60°W a 30°E). La concordancia entre este patrón creciente y los cambios proyectados encontrados en estudios previos, basados en diferentes escenarios y modelos de extremos dan robustez a este resultado.

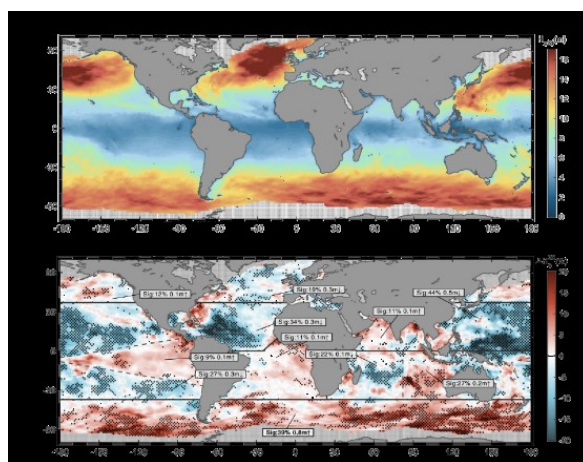


Fig. 2: (a) Valor estimado de la Hs (en metros) asociado a 20 años de periodo de retorno. (b) Cambios regionales (en %) estimados para fin de siglo bajo el escenario RCP8.5 en la H20.

La proporción de cambios de mayor magnitud aumenta con la latitud, alcanzando el 29% en la región de los rugientes cuarenta (entre 40 °S y 50 °S) y el 45% en la región de los cincuenta aulladores (entre 50 °S y 60 °S). El cambio promedio esperado de +0,8 m, con aumentos locales de más de 3,5m, hace que el océano Sur sea la región donde se espera el mayor cambio en las condiciones extremas del oleaje. Además, este aumento proyectado también puede interpretarse como un aumento para 2100 en la frecuencia de ocurrencia de los temporales. Es decir, el H20 actual tendría asociado para 2100 un período de retorno inferior a 20 años. El efecto de la intensificación y el desplazamiento hacia el polo de las trayectorias de las tormentas extratropicales del sur ya se ha discutido en estudios climáticos anteriores como una causa plausible del aumento esperado en Hs. Además, el aumento proyectado en la frecuencia de ciclones extra-tropicales extremos en el Hemisferio Sur, que concuerda con estudios que analizan los modelos climáticos del CMIP5 (ej. Yin, 2005) también podría estar relacionado con el cambio obtenido en el oleaje.

El Océano Pacífico muestra una disminución tropical constante, excepto en la parte oriental. El descenso obtenido en el Pacífico norte tropical es consistente con la

disminución proyectada de los vientos, muy probablemente causado por el cambio hacia el polo esperado de las trayectorias de las tormentas del norte, convirtiéndose en la región con mayor robustez de cambio de las once analizadas. De manera similar, la fuerte disminución encontrada en pacífico tropical sur también puede explicarse por el desplazamiento hacia el polo de la trayectoria de las tormentas.

La región tropical del atlántico norte se caracteriza por un patrón decreciente con un cambio promedio de 0,4 m. Esta disminución proyectada en el Atlántico tropical noroccidental podría deberse a una disminución en la frecuencia de los ciclones tropicales de baja intensidad o, más probablemente, a una extensión hacia el oeste del cambio negativo de los vientos del norte de latitudes medias a bajas. La parte más occidental de la región afectada por tormentas intensas muestra una gran incertidumbre en los cambios proyectados. Sin embargo, se puede observar un aumento homogéneo alrededor de la costa de Florida que concuerda con el aumento esperado en la velocidad del viento de los principales ciclones que se generan en el Océano Atlántico (Patricola, 2018). En la región tropical sur, en cambio, se obtiene un débil aumento del oleaje extremo.

El patrón de cambio en el Océano Índico tropical se caracteriza por un comportamiento bipolar en la región sur, de modo que mientras se espera una disminución en el oeste, la señal de cambio en el este es opuesta. A diferencia de las cuencas del Pacífico y del Atlántico, el Océano Índico norte tropical muestra una gran incertidumbre.

Los cambios proyectados bajo el escenario RCP4.5 muestran una gran similitud general en el patrón de cambio espacial (mismo signo de cambio en cada región) y una mayor incertidumbre con respecto a RCP8.5. Las variaciones más notables en la magnitud del cambio medio se observan en las regiones del océano Sur, Pacífico y Atlántico norte tropical.

Finalmente, con el fin de evaluar las similitudes y diferencias entre el comportamiento futuro de las condiciones de olas medias y extremas, se han comparado los cambios proyectados en la Hs media anual y la H20. Para ello, se evalúa la concordancia en el signo del cambio de estas dos climatologías, clasificando las variaciones como bajas o grandes en comparación con la mediana global (una o dos flechas en la figura 3). También se analiza la incertidumbre combinada de los cambios (el punteado denota cambios robustos en la Hs media y H20). En general, se observa una concordancia entre ambas climatologías en el signo del cambio (azul y rojo en la figura 3), pero también se pueden observar diferencias relevantes en el patrón de cambio espacial (amarillo y verde) y en la evaluación de la incertidumbre. La robusta uniformidad decreciente encontrada para las condiciones medias en el hemisferio norte no se detecta para las condiciones extremas en ciertas regiones (por ej. en la costa este de América del Norte o la región nororiental del Pacífico). En el océano Índico se obtienen cambios de signo opuesto asociados con aumentos en los extremos, en muchos casos acompañado por un aumento notable de la incertidumbre. De las regiones en desacuerdo en el signo del cambio entre las condiciones medias y extremas, el Pacífico nororiental muestra una alta robustez y magnitud de los cambios obtenidos. Además, es especialmente destacable la gran incertidumbre y un patrón heterogéneo en el Atlántico norte para los extremos.

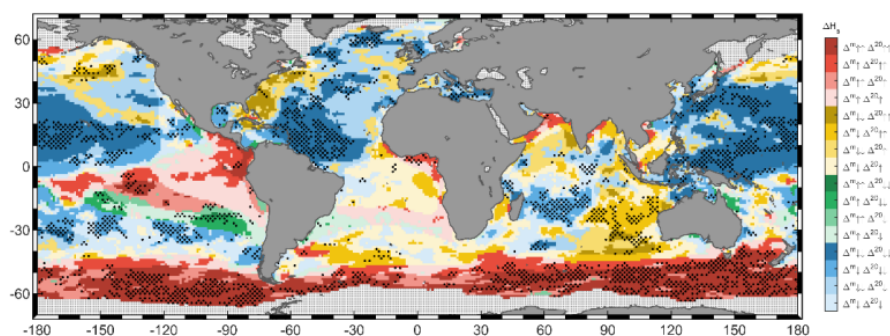


Fig. 3: Comparativa de los cambios proyectados a fin de siglo bajo el escenario RCP8.5 entre la Hs media (Δm) y extremal ($\Delta 20$). Los colores representan las combinaciones de signo de cambio entre las dos climatologías. Para cada combinación, una flecha indica un cambio relativo más bajo que la mediana global y dos flechas indican cambios relativos más altos que la mediana global. El punteado denota cambios estadísticamente significativos para las dos magnitudes analizadas.

AGRADECIMIENTOS

Ayuda RTI2018-096449-B-I00 del proyecto EXCEED, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A. V., Filipot, J. F., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffelec, P., Lefevre, J. M., Aouf, L., and Collard, F. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9):1917–1941.
- Bricheno, L. M. and Wolf, J. (2018). Future Wave Conditions of Europe, in Response to High-End Climate Change Scenarios. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(12):8762–8791.
- Camus, P., Losada, I. J., Izaguirre, C., Espejo, A., Menéndez, M., & Pérez, J. (2017). Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future*, 5(9), 918-933.
- Casas-Prat, M., Wang, X. L., and Swart, N. (2018). CMIP5-based global wave climate projections including the entire Arctic Ocean. *Ocean Modelling*, 123(April 2017):66–85.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (Vol. 208, p. 208). London: Springer.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., and Wehner, M. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013: the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M., Frame, D., Mahowald, N., and Winther, J.-G. (2013). Introduction. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., editors, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Dobrynin, M., Murawsky, J., and Yang, S. (2012). Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments. *Geophysical Research Letters*, 39(17):2–7.
- Dodet, G., Melet, A., Arduin, F., Bertin, X., Idier, D., & Almar, R. (2019). The contribution of wind-generated waves to coastal sea-level changes. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1563-1601.
- Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., and Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3(5):471–476.
- Hemer, M. A., Katzfey, J., and Trenham, C. E. (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70:221–245.
- Lemos, G., Menendez, M., Semedo, A., Camus, P., Hemer, M., Dobrynin, M., and Miranda, P. M. (2020). On the need of bias correction methods for wave climate projections. *Global and Planetary Change*, 186(August 2019):103109.
- Lemos, G., Semedo, A., Dobrynin, M., Behrens, A., Staneva, J., Bidlot, J. R., and Miranda, P. M. (2019). Mid-twenty-first century global wave climate projections: Results from a dynamic CMIP5 based ensemble. *Global and Planetary Change*, 172(July 2018):69–87.
- Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutiérrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M., Hall, A., and Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11):764–773.
- Melet, A., Almar, R., Hemer, M., Le Cozannet, G., Meyssignac, B., and Ruggiero, P. (2020). Contribution of Wave Setup to Projected Coastal Sea Level Changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(8).
- Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T., and Mase, H. (2013). Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios-Future change of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering*, 71:122–129.
- Morim, J., Hemer, M., Cartwright, N., Strauss, D., and Andutta, F. (2018). On the concordance of 21st century wind-wave climate projections. *Global and Planetary Change*, 167(May):160–171.
- Morim, J., Hemer, M., Wang, X. L., Cartwright, N., Trenham, C., Semedo, A., Young, I., Bricheno, L., Camus, P., Casas-Prat, M., Erikson, L., Mentaschi, L., Mori, N., Shimura, T., Timmermans, B., Aarnes, O., Breivik, Ø., Behrens, A., Dobrynin, M., Menendez, M., Staneva, J., Wehner, M., Wolf, J., Kamranzad, B., Webb, A., Stopa, J., and Andutta, F. (2019). Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nature Climate Change*, 9(9):711–718.
- Patricola, C. M. and Wehner, M. F. (2018). Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563(7731):339–346.

- Perez, J., Menendez, M., & Losada, I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124, 1-11.
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., and McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate*, 20(17):4356–4376.
- Reguero, B. G., Losada, I. J., and Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10 (1).
- Shope, J. B., Storlazzi, C. D., Erikson, L. H., and Hegermiller, C. A. (2016). Changes to extreme wave climates of islands within the Western Tropical Pacific throughout the 21st century under RCP 4.5 and RCP 8.5, with implications for island vulnerability and sustainability. *Global and Planetary Change*, 141:25–38.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485-498.
- Thomson, J. and Rogers, W. E. (2014). Swell and sea in the emerging Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 41(9):3136–3140.
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I. J., Le Cozannet, G., Nicholls, R. J., Idier, D., and Maspataud, A. (2020). Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment. *Earth-Science Reviews*, 202(January):103110.
- Tolman, H. L. (2014). The WAVEWATCH III Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. Technical Note, Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, College Park, MD.
- Wang, X. L., Feng, Y., and Swail, V. R. (2014). Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations. *Geophysical Research Letters*, 41(3):1026–1034.
- Wang, X. L., Zwiers, F. W., and Swail, V. R. (2004). North Atlantic ocean wave climate change scenarios for the twenty-first century. *Journal of Climate*, 17(12):2368–2383.
- Yin, J. H. (2005). A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophysical Research Letters*, 32(18):1–4.