

Reducción de escala estadística y corrección del sesgo de la altura de la ola en las costas cubanas



<https://cu-id.com/2377/v31n2e01>

Statistical downscaling and wave height bias correction for Cuban coasts

 Axel Hidalgo Mayo^{1*},  Ida Mitrani Arenal²

¹Universidad de Holguín y Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Instituto de Meteorología, Cuba.

²Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas, Universidad de La Habana y Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba.

RESUMEN: Se presentan las proyecciones de la altura significativa de la ola (H_{sig}) referidas a los períodos 2041-2070 (mediano) y 2071-2100 (largo plazo) respecto a 1981-2010, mediante la reducción de escala estadística para el archipiélago cubano. Se emplearon datos del reanálisis ERA5 y de las boyas meteorológicas 42003 y 42056; así como las salidas de cinco modelos climáticos globales (GCM) para los escenarios climáticos SSP2-4,5 y SSP5-8,5. Los métodos de validación utilizados fueron el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error medio (BIAS), la raíz del error cuadrático medio (RSME), el índice de habilidad de Taylor (TSS) y el índice de habilidad (SS). Al mismo tiempo, se empleó la corrección BIAS (BC) por el método delta y el mapeo delta cuantil (DQM), así como la interpolación bilineal. Los resultados indican que el modelo de regresión utilizado para estimar H_{sig} en función de la velocidad del viento, para la media de los cinco GCM (MMM), después de aplicar BC, mostró $R=0,90$, $RSME=0,09$ m, $TSS=0,81$ y $SS=0,64$ para valores medios mensuales; mientras que para datos diarios, referidos a los percentiles 50 y 90, $RSME$ osciló entre 0,2-0,6 m. Se espera que la media anual de H_{sig} aumente en las costas cubanas en todos los períodos y escenarios climáticos analizados respecto a 1981-2010, excepto para SSP5-8,5 del largo plazo; mientras que los indicadores extremos de cambio climático empleados indican que el clima marino cubano referido a H_{sig} estaría transitando a ser más extremo, para cada uno de los períodos y escenarios climáticos analizados.

Palabras clave: cambio climático, clima marino, CMIP6, corrección BIAS, reducción de escala estadística.

ABSTRACT: Projections of significant wave height (H_{sig}) for the periods 2041-2070 (mid-term) and 2071-2100 (long-term) with respect to 1981-2010 are presented using statistical downscaling for the Cuban archipelago. Data from the ERA5 reanalysis and meteorological buoys 42003 and 42056 were used, as well as the output of five global climate models (GCM) for the climate scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The validation methods used were Pearson's correlation coefficient (R), mean error (BIAS), root mean square error (RSME), Taylor Skill Score (TSS) and Skill Score (SS). At the same time, BIAS correction (BC) by delta method and delta quantile delta mapping (DQM) as well as bilinear interpolation were applied. The results show that the regression model used to estimate H_{sig} as a function of wind speed, for the mean of the five GCMs (MMM), after application of BC, showed $R=0.90$, $RSME=0.09$ m, $TSS=0.81$ and $SS=0.64$ for monthly means, while for daily data, related to the 50th and 90th percentiles, $RSME$ ranged between 0.2-0.6 m. The annual mean H_{sig} is expected to increase in the Cuban coasts in all periods and climatic scenarios analyzed with respect to 1981-2010, except for SSP5-8.5 in the long term; while the extreme indicators of climate change used indicate that the Cuban marine climate in terms of H_{sig} would transition to be more extreme, for each of the periods and climatic scenarios analyzed.

Key words: BIAS correction, climate change, CMIP6, marine climate, statistical downscaling.

*Autor para correspondencia: Axel Hidalgo Mayo. E-mail: axel.hidalgom@gmail.com

Recibido: 12/10/2024

Aceptado: 14/04/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Axel Hidalgo Mayo. **Conceptualizó la investigación. Trabajó en el procesamiento de los datos, así como en el análisis e interpretación de los resultados. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.** Ida Mitrani Arenal. **Participó en el análisis e interpretación de los resultados, así como en la revisión del manuscrito.**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La proyección del clima futuro implica el análisis de la variabilidad climática y el uso de las salidas de los modelos climáticos globales (GCM), que tienen en cuenta las alteraciones del sistema climático global ante diversos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Por su parte, el clima marino futuro referido a Hsig, para una región, podría estimarse extrapolando tendencias obtenidas a partir de datos históricos; sin embargo, este enfoque no es apropiado para el análisis a largo plazo, ya que el incremento de las concentraciones de GEI en la atmósfera puede conducir a cambios que no quedan reflejados en las tendencias históricas (Pérez *et al.*, 2014). En este contexto, los GCM se han convertido en herramientas valiosas para estimar los cambios en el clima para diferentes escenarios futuros (Cracknell & Varostos, 2022).

Los GCM no garantizan proyecciones confiables del clima futuro, debido a que estos consideran forzamientos de GEI fuera del rango utilizado en el período histórico (Cracknell & Varostos, 2022). Además, los GCM, en sus distintas versiones, no simulan Hsig (Wang *et al.*, 2014; Taniguchi, 2019; Noël *et al.*, 2021). Por otro lado, la resolución espacial de los GCM no es capaz de representar las condiciones climáticas a escala regional, por lo que la reducción de escala estadística (SD) y la corrección de sesgo (BIAS) son una posible solución a las diferencias entre las observaciones y las modelaciones (Parker & Hill, 2017; Maraun & Widmann, 2018; Lemos *et al.*, 2020).

La proyección climática puede desarrollarse mediante la reducción de escala dinámica (DD) y estadística (SD), e incluso mediante la combinación de ambas (Maraun & Widmann, 2018). De estos métodos, el DD ha sido el más utilizado en los estudios del clima marino, ya que la mayoría de estos se han realizado a escala global (deCastro *et al.*, 2024). No obstante, los mismos autores señalan que los estudios relacionados con SD han persistido en el tiempo desde 2006 hasta la actualidad.

En las investigaciones de Wang *et al.* (2014) y Camus *et al.* (2017), se realizó una comparación entre ambos métodos de reducción de escala, concluyéndose que pueden ser empleados indistintamente, ya que el SD depende únicamente de la resolución del GCM empleado. Además, se han obtenido resultados más favorables con SD a partir de ciertas correcciones, en lo referido al clima medio y la variabilidad interanual (Parker & Hill, 2017; Lemos *et al.*, 2020). Por otro lado, el SD al requerir un menor esfuerzo computacional, permite el análisis simultáneo de un elevado número de GCM y simulaciones a la vez (Maraun & Widmann, 2018). Este hecho posibilita la utilización de varios escenarios climáticos y múltiples GCM de forma simultánea, lo que redundaría en una

disminución de la incertidumbre de las proyecciones climáticas (Cracknell & Varostos, 2022).

Con el propósito de profundizar en la proyección de Hsig, el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, por sus siglas en inglés), el COI (Comité Oceanográfico Internacional) y la OMM (Organización Meteorológica Mundial) aunaron esfuerzos para crear el proyecto COWCLIP (Proyecto Coordinado para la Proyección del Clima Marino, por sus siglas en inglés) (Hemer *et al.*, 2012). Años sucesivos, en el contexto de COWCLIP2.0, se desarrollaron indicadores climáticos extremos para la detección del cambio climático en función de Hsig (Morim *et al.*, 2021), los cuales han sido aplicados en estudios de variabilidad climática (Sardana *et al.*, 2022; Hidalgo *et al.*, 2023; Kaur *et al.*, 2023) y de proyección climática (Krishnan *et al.*, 2021; Hidalgo *et al.*, 2024; Yadav *et al.*, 2024; Appendini *et al.*, 2025).

En lo que respecta al océano global, las proyecciones de Hsig exhiben una elevada incertidumbre entre los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, con una variabilidad que puede ser diez veces superior entre uno y otro (Wang *et al.*, 2014). Por su parte, para el año 2060, se proyecta que el 60% de las superficies oceánicas presentarían indicios del cambio climático (Dobrynin *et al.*, 2015). En este mismo sentido, en el Océano Atlántico Norte, para finales del siglo XXI, fundamentalmente, para el escenario RCP8,5, podría ocurrir una disminución de Hsig (Meucci *et al.*, 2020; Lemos *et al.*, 2021).

Para el golfo de México (GM), Appendini *et al.* (2014) examinaron la evolución futura de Hsig máxima, considerando exclusivamente la actividad ciclónica para finales de siglo, obteniendo resultados diferentes para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5. Por su parte, Hidalgo & Mitrani (2024) identificaron una reducción de esta variable para los períodos 2031-2060 y 2061-2090, con cambios estadísticamente significativos para el GM occidental. En el caso particular de Cuba, las proyecciones climáticas en áreas oceánicas se han llevado a cabo, principalmente, en relación con el ascenso del nivel medio del mar (Planos *et al.*, 2013; Hernández *et al.*, 2014; Iturralde & Serrano, 2015; Pérez, 2019; Planos & Gutiérrez, 2020). No obstante, de acuerdo con la bibliografía disponible, para Hsig, estos estudios se limitan a los realizados por Losada *et al.* (2018) e Hidalgo *et al.* (2024).

Por tanto, tomando en consideración los resultados de la comparación entre DD y SD, así como los antecedentes relacionados con la proyección del clima marino, el objetivo de este estudio fue determinar los cambios en los regímenes medios y extremos de Hsig en las costas cubanas. Para ello, se empleó la reducción de escala estadística y los períodos 2041-2070 y 2071-2100 y los escenarios climáticos SSP2-4,5 y SSP5-8,5, así como el período histórico 1981-2010.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio y fuentes de información empleadas

En la [figura 1](#) se muestra la batimetría del golfo de México y el mar Caribe, así como los mares adyacentes a Cuba obtenidos a partir de la página web www.gebco.net. Se seleccionó el dominio (7-32°N; 58-98°W) para representar la generación y propagación de las olas, siguiendo las recomendaciones de [Camus et al. \(2017\)](#) para la reducción de escala estadística. Por su parte, el subdominio (19-24°N; 73-86°W) obedece a la necesidad de representar con una alta resolución los regímenes normales y extremos de Hsig, que es uno de los objetivos de la presente investigación. En la propia [figura 1](#), se muestra la ubicación de las boyas meteorológicas 42003 y 42056, las cuales son las más cercanas al área de estudio y fueron utilizadas por [Hidalgo et al. \(2024\)](#).

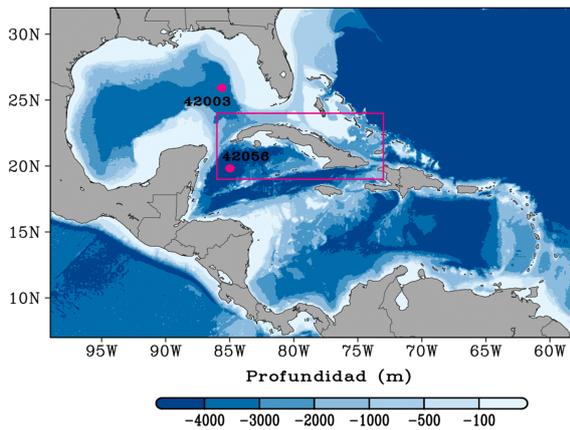


Figura 1. Batimetría del golfo de México y el mar Caribe, el área de estudio (rectángulo magenta) y ubicación de boyas meteorológicas empleadas

Como fuentes de información se utilizaron los datos de las boyas meteorológicas de la Administración del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, con información disponible de manera ininterrumpida para el período 2007-2014 (ver [figura 1](#)), a partir de <https://dods.ndbc.noaa.gov>. Estas boyas son la 42003 (25,925°N; 85,616°W) y la 42056 (19,820°N; 84,980°W) las cuales se encuentran ubicadas en golfo de México oriental y el Canal de Yucatán.

Además, se empleó el reanálisis ERA5, para el período 1950-2014, a través de la página web <http://cds.climate.copernicus.eu>, de las variables: Hsig y velocidad del viento (WS) a 10 m. El mencionado reanálisis posee una resolución espacial de 0,5° (55,5 km) para Hsig y 0,25° (27,75 km) para WS, estando ambas variables disponibles en netCDF.

Para las proyecciones de cambio climático se emplearon los escenarios climáticos SSP2-4,5 (rivalidad regional) y SSP5-8,5 (desarrollo con combustibles fósiles) ([Gidden et al., 2019](#)). La elección de estos escenarios se fundamentó en su predominio al momento de realizar proyecciones del clima marino en función de Hsig para los GCMs de CMIP6 ([Baghanian & Alizadeh, 2022](#); [Badriana & Lee, 2023](#); [Lemos et al., 2023](#); [Meucci et al., 2024](#)).

En esta investigación se utilizó el viento cercano a superficie (sfcWind) de cinco GCM (ver [tabla 1](#)), a partir de la página web <https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/CMIP6/>, para el período histórico 1950-2014 y el futuro 2015-2100 con una resolución temporal diaria. El período base para las proyecciones climáticas fue el comprendido entre 1981 y 2010, representando la última normal climática sin forzamiento radiativo de los GCM de CMIP6. Las proyecciones se realizaron para los períodos 2041-2070 y 2071-2100.

El uso de los GCM presentados en la [tabla 1](#), se justifica por la disponibilidad de información para datos diarios de sfcWind, abarcando tanto el período histórico como ambos escenarios climáticos. La elección de sfcWind se fundamentó en su inclusión en la metodología desarrollada por [Hidalgo et al. \(2024\)](#), la cual emplea SD para estimar Hsig, constituyendo así el enfoque metodológico de esta investigación.

Métodos matemáticos utilizados en la validación de los resultados

En los estudios de modelación del clima marino los métodos de validación empleados con mayor frecuencia han sido el error BIAS y RSME ([Parker & Hill, 2017](#); [Lemos et al., 2023](#); [Lira et al., 2023](#); [Yadav et al., 2024](#)). La formulación matemática de estas dos métricas se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (1)$$

Tabla 1. Resumen de los GCM empleados

GCM	Resolución (lat. x long.)	País
ACCESS-CM2	1,250° x 1,875°	Australia
GFDL-ESM4	1,000° x 1,250°	Estados Unidos
HadGEM3-GC31-LL	1,250° x 1,875°	Reino Unido
MIROC6	1,401° x 1,406°	Japón
MPI-ESM1-2-LR	1,855° x 1,875°	Alemania

$$RSME = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2\right)} \quad (2)$$

Donde: x_i, y_i son los valores reales y estimados o modelados respectivamente, mientras n y \bar{x} representan es el tamaño de la muestra y la media aritmética de las mediciones por ese orden.

Otro índice de interés es el TSS, el cual ha sido empleado en este tipo de investigaciones por [Mohan & Bhaskaran \(2019\)](#) y [Krishnan et al. \(2021\)](#), y se puede calcular mediante la ecuación:

$$TSS = \frac{4(1+R)^4}{\left(STD + \frac{1}{STD}\right)^2 (1+R_0)^4} \quad (3)$$

Donde: STD es la razón entre las desviaciones estándar modelada y la de referencia; mientras R es coeficiente de correlación de Pearson, en tanto R_0 denota el máximo de correlación (1). Los valores óptimos se obtienen cuando TSS tiende a 1.

Para determinar el cambio relativo entre el MMM (media de todos los GCM) proyectado y el de referencia se implementó la [ecuación 4](#) ([Parker & Hill, 2017](#); [Mohan & Bhaskaran, 2019](#); [Morim et al., 2021](#); [Kaur et al., 2023](#)). Esta ecuación indica que valores positivos muestran un incremento de Hsig en el futuro y viceversa.

$$RC = \frac{MMM_{FUT} - MMM_{HIST}}{MMM_{HIST}} \quad (4)$$

Donde: MMM_{FUT}, MMM_{HIST} representan los valores del MMM de los GCM para el período futuro e histórico respectivamente.

En lo que respecta al análisis del cambio entre la proyección climática y el período base, se utilizó la prueba de t para la comparación de dos medias con varianzas similares. La hipótesis nula (las medias del período futuro proyectado y el base son similares), se rechaza para un nivel de significación (α) del 5%, si $|t| > 1,96$ ([Wilks, 2019](#)).

Corrección BIAS

Los GCM han sido la principal fuente de información en las evaluaciones de los impactos del cambio climático en diferentes escalas; sin embargo, los estudios locales rara vez utilizan directamente los resultados de GCM, debido a su baja resolución espacial. Para abordar esta limitación se ha recurrido, fundamentalmente, a la BC, la cual permite reducir el sesgo entre el GCM y los datos conocidos ([Maraun & Widmann, 2018](#)).

El enfoque de BC supone que los errores se propagan hasta el final del período y se fundamentan en el ajuste de los valores modelados respecto a valores observados ([Maraun & Widmann, 2018](#)). Esta metodología se aplicó para ajustar las proyecciones climáticas de los GCM en relación con un período de referencia establecido a partir de datos históricos simulados del reanálisis ERA5. En este mismo sentido, [Parker & Hill \(2017\)](#) concluyeron que la mejor opción sería aplicar BC a las estimaciones de esta variable a partir del modelo de predicción.

El método delta o de perturbación consiste en un ajuste homogéneo de la distribución de la variable a corregir entre el valor histórico u observado y el proyectado por los GCM ([Maraun & Widmann, 2018](#)). Este método puede ser empleado para la corrección aditiva o multiplicativa. No obstante, para el clima marino [Parker & Hill \(2017\)](#) y [Lemos et al. \(2020\)](#) emplearon la primera de ellas. Sin embargo, [Maraun & Widmann \(2018\)](#) usaron la siguiente expresión, la cual corrige la media y la varianza simultáneamente:

$$T_{BC(i)} = \bar{T}_{OBS(i)} + \frac{sd_{OBS(i)}}{sd_{GCM(i)}} \cdot (T_{GCM(i)} - \bar{T}_{GCM(i)}) \quad (5)$$

Donde:

$T_{BC(i)}$: Valor de la variable a partir a partir de la BC.

$T_{GMC(i)}$: Valor de la variable proyectada.

$\bar{T}_{OBS(i)}, \bar{T}_{GCM(i)}$: Valor medio de la variable del reanálisis u observada y la del GCM por ese orden en el período de referencia. El subíndice ($i = 1, 2, \dots, 12$) se refiere al número de meses.

$sd_{OBS(i)}, sd_{GCM(i)}$: son los valores de la desviación estándar para los valores observados y modelados en el período histórico o de calibración respectivamente.

De acuerdo con [Maraun & Widmann \(2018\)](#), la BC por la [ecuación 5](#) resulta válida únicamente para regímenes medios; sin embargo, para valores extremos, se emplea el mapeo cuantil empírico (EQM) ([Cannon et al., 2015](#); [Maraun & Widmann, 2018](#)). En el caso particular de Hsig, [Lemos et al. \(2020\)](#) aplicaron la BC por EQM mediante el mapeo delta cuantil (DQM) a partir de las siguientes expresiones:

$$X_i = \left[ecdf_{(OBS)}^{-1}(q_i) - ecdf_{(GCM)}^{-1}(q_i) \right], i = 1, 2, \dots, n_q \quad (6)$$

$$H_{sig}^{BC}(q_i) = H_{sig}^{GCM}(q_i) + X(q_i), i = 1, 2, \dots, n_q \quad (7)$$

Donde:

$ecdf_{(OBS)}^{-1}, ecdf_{(GCM)}^{-1}$: son las inversas de las distribuciones empíricas acumuladas para los datos observados por ERA5 y los estimados por los GCM para el período histórico respectivamente.

q_i : Orden del cuantil, distribuidos linealmente ($q_i = 1, 2, \dots, 99; i = 1, \dots, n_q = 99\text{percentil}$).

$H_{sig}^{BC}, H_{sig}^{GCM}$: Son los valores de Hsig con BC y los estimados por el GCM por ese orden.

En todos los casos, las métricas implementadas para la BC, tanto para el régimen normal por el método delta como por DQM, resultaron dentro de la muestra o período de ajuste de los GCM. Las evaluaciones realizadas fuera del período histórico o con forzamiento radiativo representan un desafío significativo para la comunidad científica, ya que las proyecciones de los GCM simulan bajo diferentes supuestos de concentración de GEI (Li *et al.*, 2019).

Por último, con el propósito de evaluar la efectividad de BC se implementó SS (Lira *et al.*, 2023):

$$SS = \frac{E^{BC} - E^{NBC}}{E^{OPT} - E^{NBC}} \quad (8)$$

Donde:

E^{BC} , E^{NBC} y E^{OPT} : representan los errores con BC, sin BC y el error óptimo por ese orden. Para este último caso, se emplea comúnmente el valor de RSME (Lira *et al.*, 2023), mientras que valores altos de SS indican una alta habilidad del GCM en la proyección climática después de realizar la BC.

Metodología empleada para estimar Hsig mediante la reducción de escala estadística

Para estimar los valores de Hsig en función de sfcWind, que es la variable disponible en los GCM de CMIP6 para datos diarios, se empleó el modelo de regresión de Theil-Sen. Este modelo, al ser no paramétrico, resulta de gran utilidad cuando las variables están sujetas a valores atípicos o no se distribuyen normalmente (Wilks, 2019). Para ello, se transformaron los valores de los GCMs y ERA5 a una misma resolución (0,25°) en forma de cascada (1,00°-0,50°-0,25°), estimándose esta variable punto de rejilla por punto de rejilla para todo el dominio de la figura 1 (7-32°N; 58-98°W), aunque finalmente se representó Hsig en un dominio más reducido (19-24°N; 73-86°W), pero de igual resolución espacial.

Para SD, Camus *et al.* (2017) enfatiza en que el dominio espacial debe abarcar el área de la cuenca oceánica de generación de las olas que afectan la región de estudio; mientras, que la(s) variable(s) independiente(s) debe(n) mostrar las condiciones atmosféricas históricas recientes, de manera que se representen los procesos de generación y propagación de las olas. La metodología empleada para estimar los valores de Hsig sigue la misma línea que la desarrollada por los autores previamente mencionados, así como la aplicada por Hidalgo *et al.* (2024).

En este sentido, el procedimiento para la estimación de Hsig por SD se desarrolló de la siguiente manera:

- Se obtuvieron las mediciones de las boyas meteorológicas empleadas, lo que dio lugar a la expresión matemática que relaciona los valores de Hsig con sfcWind. Para ello, se empleó un modelo de regresión del tipo $Hsig = f(sfcWind)$ a partir de resultados previos obtenidos por Hidalgo *et al.* (2024).
- Los valores de Hsig calculados para cada punto de rejilla usando el reanálisis ERA5 y las salidas de los GCMs se llevaron a una misma resolución (0,25°). Para ello se implementó la interpolación bilineal en forma de cascada (1,00°-0,50°-0,25°) con el propósito de minimizar los errores de interpolación (Torma *et al.*, 2015), ya que este método representa de manera más precisa el proceso de reducción de escala para la velocidad del viento (Ramon *et al.*, 2019).
- Por último, se emplearon como métricas de comparación los errores BIAS, RSME, TSS y SS para analizar los GCM y construir el conjunto de los datos. Además, se implementó la BC mediante el método delta y DQM a través de las ecuaciones 5-7.

Al mismo tiempo, se aplicaron dos indicadores climáticos extremos para la detección del cambio climático referido a Hsig, los cuales fueron desarrollados por el ETCCDI (Grupo de Expertos sobre Indicadores y Detección de Cambio Climático, por sus siglas en inglés) para la versión 2.0 del proyecto COWCLIP. De acuerdo con Morim *et al.* (2021), estos indicadores resumen las características fundamentales de las olas oceánicas extremas.

- Frecuencia de días donde Hsig es superior al 90 percentil del período base (HsigFD).
- Días consecutivos con Hsig superior al 90 percentil del período base (HsigCD).

Por último, todo el proceso de cálculo y cartografía, para el sistema de coordenadas WGS-84, se realizó mediante la combinación de los softwares GrADS, CDO y R; mientras para este último, se utilizaron, además, los paquetes “ggplot” y “RobustLinearReg”.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación de los resultados

Modelo de regresión

La aplicación del modelo de regresión de forma independiente para ambas boyas meteorológicas entre los años 2007-2014 arrojó una disponibilidad de datos superior al 83%; mientras la comparación entre los valores reales y los modelados magnitudes de R (0,86-0,88), BIAS (-0,116 m a -0,105 m),

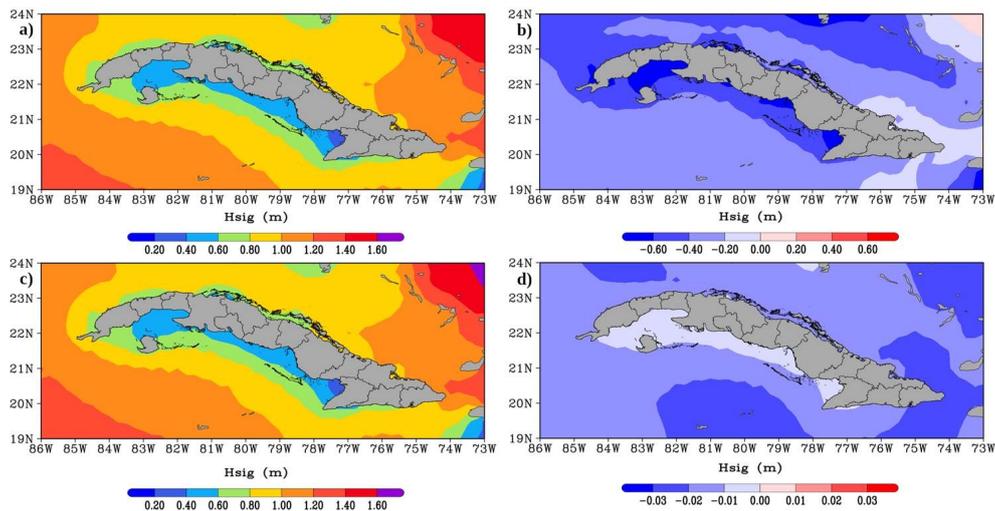


Figura 2. Comparación de Hsig entre los valores medios anuales modelados y los de referencia durante el período histórico 1981-2010. Media anual de ERA5 (a) y MMM (c), así como los errores sin BC (b) y con BC (d)

RSME (0,34-0,37 m) y TSS (0,75-0,76). Por su parte, los valores calculados en esta investigación son similares a los obtenidos por [Appendini et al. \(2014\)](#) para estas propias boyas: R (0,90), BIAS (-0,03 m y 0,09 m) y RSME (0,32-0,33 m). Por último, también se evidencia correspondencia respecto a los determinados para TSS (0,6-0,9), en el Océano Índico por [Krishnan et al. \(2021\)](#).

Errores de Hsig para regímenes normales y extremos

En el caso de los errores BIAS ([figura 3b](#)), se apreció que los medios anuales en el período 1981-2010 para el MMM respecto a ERA5, antes de aplicar BC por la [ecuación 5](#), sobrestiman a ERA5 en todas las costas cubanas con valores que exceden los 0,4 m, fundamentalmente, en la costa sur de las regiones central y occidental, así como en la noroccidental. Sin embargo, al aplicar BC entre los valores modelados y los de referencia ([figura 3d](#)), estos se reducen al orden de 10^{-2} m. Estos errores exhiben una magnitud comparable con las variaciones interanuales de Hsig y la exactitud de las mediciones de dicha variable por las boyas meteorológicas, de acuerdo a la información disponible en <https://dods.ndbc.noaa.gov>. Estos resultados ponen de manifiesto la efectividad del método empleado, así como la correspondencia y exactitud del MMM respecto a ERA5.

Como análisis complementario se representaron espacialmente el índice SS, el cual se muestra en la [figura 3](#). Los valores de SS fueron superiores a 0,9 para la costa sur central y occidental, siendo solamente inferiores a 0,7 en ambas costas orientales; sin embargo son superiores a los obtenidos por [Lira et al. \(2023\)](#) para el Mar Mediterráneo (inferiores a 0,35).

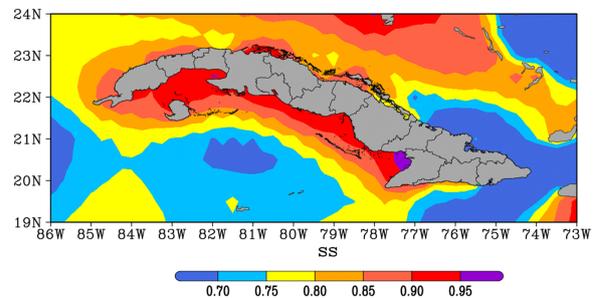


Figura 3. Valores de SS con BC para los regímenes normales de Hsig en el período 1981-2010

En resumen, de acuerdo con los resultados mostrados en las [figuras 2 y 3](#), queda explícito la efectividad de la [ecuación 5](#) para la corrección de los sesgos entre los valores modelados y los de referencia, así como la exactitud del MMM en la estimación de Hsig para las costas cubanas.

En lo concerniente a los regímenes extremos, las mayores diferencias entre el MMM y ERA5 se observaron en el Golfo de Batabanó y en la costa noroccidental de Cuba con valores superiores a 0,7 m (ver [figura 4](#)). Tras aplicar la BC, dichos errores disminuyeron entre 0,2-0,5 m, siendo únicamente superiores en la región noroccidental. En general, la BC resultó ser más efectiva para el 50 percentil que para el 90, aunque las diferencias no fueron notables. En este mismo sentido, destaca, que los valores de RSME para el 50 percentil resultaron similares a los obtenidos en la validación del modelo de regresión respecto a las boyas meteorológicas (0,28-0,33 m), así como a los obtenidos para el Atlántico Norte (0,34-0,50 m) por [Lemos et al. \(2023\)](#), lo que indica, igualmente, la significación de la corrección BIAS empleada y la robustez del MMM obtenido.

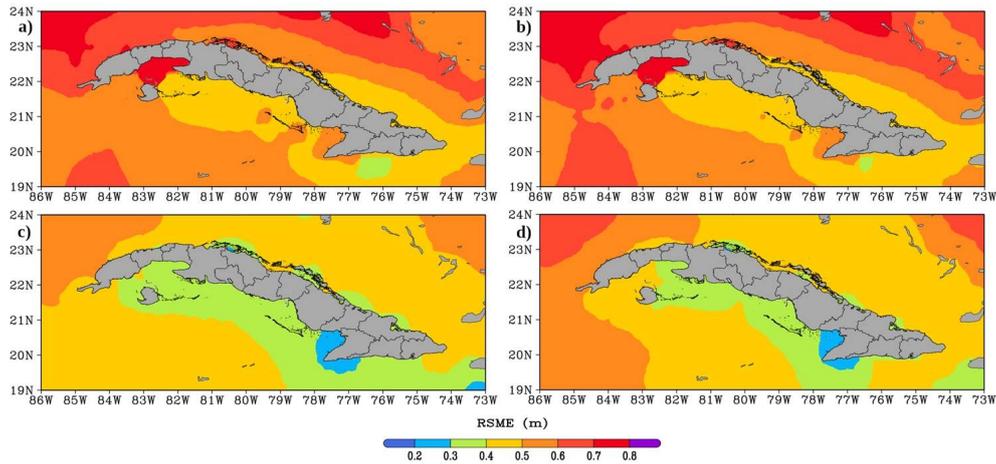


Figura 4. RSME entre los valores diarios estimados de Hsig por el MMM y ERA5 para los percentiles 50 (a,c) y 90 (b,d), sin BC (a,b) y con BC (c,d) durante el período histórico 1981-2010

Proyección de los cambios de Hsig en las costas cubanas

Ciclos anuales y multianuales de Hsig

Para los mares adyacentes a Cuba, durante el período histórico la media y la desviación estándar de Hsig, de acuerdo al MMM, fueron de 0,76 m y 0,07 m respectivamente; mientras que los mayores valores se observaron entre diciembre y marzo, y exceden a 0,80 m (ver figura 5a). En lo que respecta a los ciclos futuros interanuales, para el mediano plazo Hsig mostraría para SSP2-4,5 en todos los meses valores inferiores a 0,05 m; mientras que para SSP5-8,5, igualmente habría un comportamiento a decrecer, aun cuando en abril sería superior (0,01 m), con magnitudes que excederían a 0,1 m en el bimestre octubre- noviembre. En lo que respecta, al largo plazo SSP2-4,5 seguiría mostrando valores inferiores al período histórico con magnitudes hasta 0,04 m, y ligeramente superiores en agosto y septiembre, aunque sin superar los 0,02 m; en tanto, para SSP5-8,5 los valores futuros serían superiores a los históricos desde enero hasta agosto, excediendo los 0,04 m en marzo y abril.

Al comparar las medias y varianzas anuales, empleando las pruebas t y el cociente de dos varianzas, para cada uno de los períodos y escenarios respecto a 1981-2010 no se observaron diferencias estadísticamente significativas para el 5% en ninguno de los dos casos (pvalores: 0,835; 0,216; 0,695 y 0,902 para la media y pvalores: 0,125; 0,177; 0,567 y 0,512 para la varianza) para el mediano en SSP2-4,5 y SSP5-8,5 y el largo plazo en este mismo orden.

En el caso del comportamiento multianual de Hsig (figura 5b), tanto para el período histórico como en ambos escenarios climáticos, esta variable tendría una razón de cambio negativa con valores de $6 \cdot 10^{-5}$, $5 \cdot 10^{-5}$ y $3.3 \cdot 10^{-4}$ respectivamente, de acuerdo con la prueba de Theil-Sen. En el futuro Hsig mostraría ciclos entre ambos escenarios, superiores para SSP2-4,5 entre

2023-2039 y 2083-2100; mientras que el resto del período futuro presentaría oscilaciones entre un escenario y otro. Al mismo tiempo, bajo forzamiento radiativo la media y la varianza no tendrían cambios estadísticamente significativos entre un escenario y otro (pvalor=0,902 y pvalor=0,629) respectivamente.

Proyección espacial de los cambios medios de Hsig

En el caso anual, para el mediano plazo todas las costas cubanas mostrarían un incremento relativo inferior al 10%, excepto en el sur de Santiago de Cuba, y cambios estadísticamente significativos para el 5% exceptuando el norte de Pinar del Río y Artemisa, así como en ambas costas orientales. Para el largo plazo en SSP2-4,5 se observarían cambios relativos y áreas con diferencias significativas, las cuales disminuirían para SSP5-8,5 con valores de RC entre un 5-10%. Este último resultado concuerda con lo planteado por Meucci *et al.* (2020) y Lemos *et al.* (2021) referido a la disminución de Hsig en el Océano Atlántico Norte para finales del siglo XXI, fundamentalmente, para RCP8,5, así como con los resultados obtenidos por Hidalgo *et al.* (2024) para las costas cubanas en el período 2061-2090 en este mismo escenario climático.

En el caso del PLL, para 2041-2070 Hsig experimentaría un incremento del escenario SSP2-4,5 al SSP5-8,5, aunque sin exceder el 5% en los valores de RC, persistiendo en ambos casos el Golfo de Guacanayabo y la costa suroccidental como las regiones con cambios estadísticamente significativos. Para el largo plazo se observaría un fenómeno análogo entre ambos escenarios, aunque se incrementarían los RC por encima del 10% en la costa norte central y oriental, así como las áreas con cambios significativos en SSP5-8,5; sin embargo, en este propio escenario los mares al sur de Cuba mostrarían una disminución de los valores de Hsig con valores hasta un 5%.

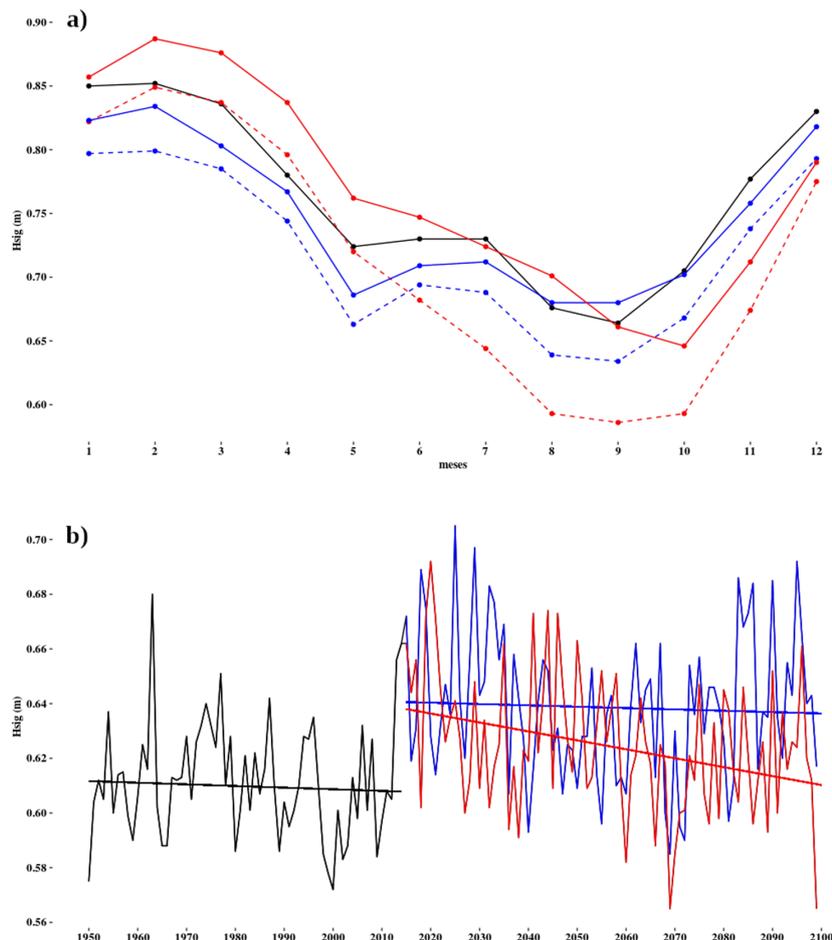


Figura 5. Ciclo anual (a) y multianual (b) de Hsig para los mares adyacentes a Cuba en el período base 1981-2010 (línea negra) y para los escenarios climáticos SSP2-4,5 (azul) y SSP5-8,5 (roja). Las curvas punteadas y continuas se corresponden al mediano y largo plazo respectivamente; mientras las líneas rectas muestran la tendencia lineal por Theil-Sen

En el PPLL se observarían los mayores cambios, fundamentalmente, para en SSP2-4,5 del largo plazo, donde todo el dominio presentaría cambios estadísticamente significativos y magnitudes que serían superiores al 10% en la regiones central y occidental de Cuba, los cuales pudieran llegar a ser superiores al 15% en el Golfo de Batabanó. Para 2071-2100, se observaría, además, en SSP5-8,5 una disminución de Hsig en los mares al sur de Cuba, sin alcanzar las magnitudes que podrían llegar a ocurrir anualmente y en el PLL.

En resumen, los valores medios anuales de Hsig en las costas cubanas aumentarían en todos los períodos y escenarios climáticos, excepto en SSP5-8,5 del largo plazo, lo cual es coherente con investigaciones precedentes. Por otro lado, las mayores variabilidades ocurrían dentro del PPLL, fundamentalmente, con mayor énfasis en SSP2-4,5 del largo plazo, donde podrían producirse cambios relativos por encima del 10% de forma homogénea en la regiones central y occidental con valores superiores al 15% en el Golfo de Batabanó.

Indicadores extremos de cambio climático referidos a Hsig en las costas cubanas

Para las costas cubanas, anualmente, los mayores valores de Hsig referidos al 90 percentil, se localizaron para el período 1981-2010, en el extremo oriental con valores que exceden 1,2 m; mientras que en ambas costas orientales y el extremo más occidental del archipiélago cubano oscilan entre 1-1,2 m. En el resto de las costas estos valores fueron inferiores a un metro, llegando a ser inferiores a 0,6 m en los golfos de Batabanó y Guacanayabo.

El comportamiento de HsigFD (ver figura 7, columna izquierda) entre 1981-2010 mostró una proporción de días por encima del 90 percentil entre un 35-45% en todas las costas cubanas, excepto en los extremos occidental y oriental del país. Este indicador mostró en todos los períodos y escenarios un aumento de la frecuencia de los días con Hsig superiores al 90 percentil respecto al período base entre un 20-30% de los casos (70-110 eventos/año), fundamentalmente, en el extremo oriental y los mares al sur de Cuba al oeste de los 81°W.

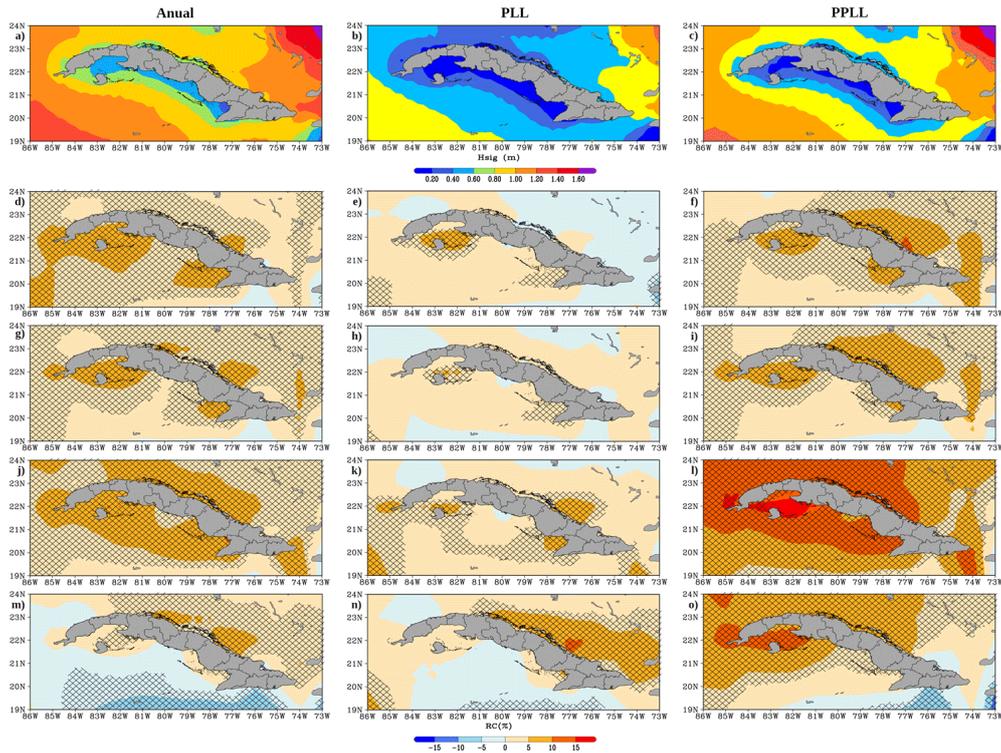


Figura 6. RC anuales proyectados de Hsig en las costas cubanas. (a, b, c) media 1981-2010, (d-i) 2041-2070 y (j-o) 2071-2100, en tanto (d-f, j-l) y (g-i, m-o) se corresponden a SSP2-4,5 y SSP5-8,5 por ese orden. Las áreas sombreadas indican las regiones donde los cambios son estadísticamente significativos para el 5%

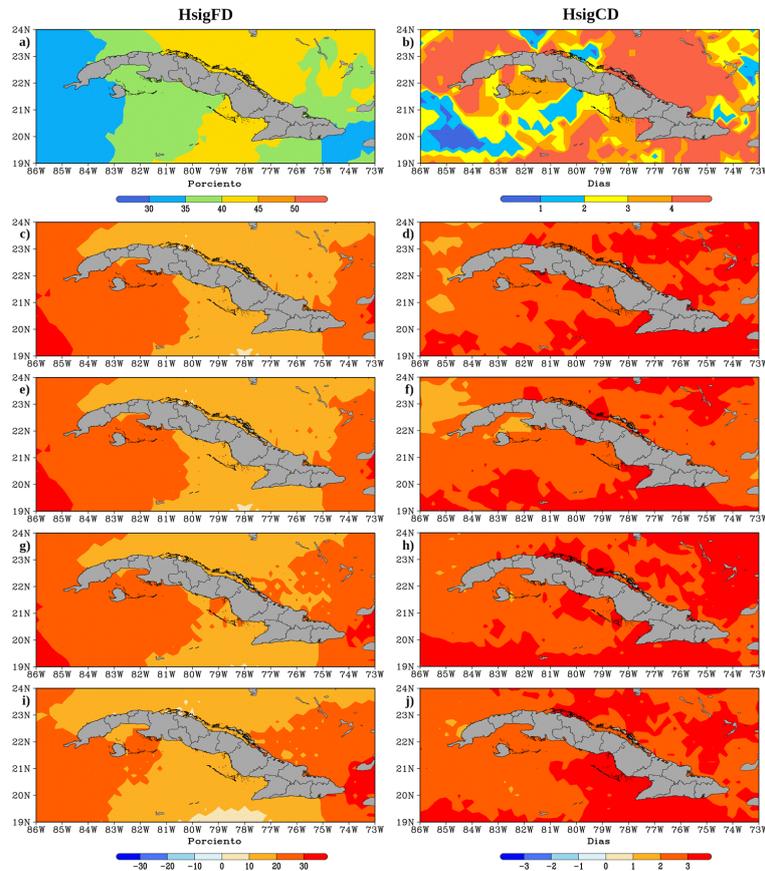


Figura 7. Cambios anuales en los indicadores climáticos HsigFD y HsigCD. (a, b) media 1981-2010, (c-f) 2041-2070 y (g-j) 2071-2100, en tanto (c-d, g-h) y (e-f, i-j) se corresponden a SSP2-4,5 y SSP5-8,5 por ese orden

En el caso de HsigCD (ver figura 7, columna derecha) para el período base ocurrieron como promedio más de 3 eventos/año, en toda la región de estudio, excepto en la costa norte de Sancti Spiritus y Villa Clara, así como en la sur desde Camagüey hasta Mayabeque y la frontera entre Artemisa y Pinar del Río. Al igual que para HsigFD, en todos los períodos se apreció un aumento en los eventos con días consecutivos de Hsig superiores al 90 percentil respecto al período de referencia 1981-2010, con más de 2 casos/años.

En resumen, tanto HsigFD como HsigCD mostraron resultados similares e indican que el clima marino cubano en función de Hsig estaría transitando a ser más extremo que en el período de referencia, para cada uno de los períodos futuros y escenarios climáticos analizados. Estos resultados, están en la misma dirección que los obtenidos por Hidalgo *et al.* (2023, 2024) en relación con la variabilidad climática y el comportamiento futuro de Hsig en las costas cubanas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y discutidos en el presente estudio, los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- El modelo de regresión empleado, respecto a las boyas meteorológicas, arrojó valores de R (0,86-0,88), errores BIAS (~ -0,11 m), RSME (0,34-0,36) y TSS (~ 0,75); mientras que el MMM, tras aplicar BC mostró valores espaciales, para los regímenes medios anuales (SS>0,7 y errores BIAS del orden de 10^{-2} m), y para los valores extremos diarios, referidos al 50 y 90 percentil, RSME (0,2-0,6 m).
- Los ciclos interanuales futuros de Hsig en las costas cubanas no mostrarían, para ningún plazo ni escenario, cambios estadísticamente significativos en la media y la varianza respecto a 1981-2010. Por su parte, la marcha multianual para ambos escenarios, tendría una razón de cambio negativa por Theil-Sen, con mayores variaciones en SSP2-4,5 pero igualmente sin cambios significativos en la media y la varianza.
- Los valores medios anuales de Hsig en las costas cubanas se incrementarían en todos los períodos y escenarios climáticos analizados, excepto en SSP5-8,5 del largo plazo, lo cual es coherente con investigaciones precedentes; mientras que las mayores variabilidades de esta variable ocurrirían dentro del PPLL, fundamentalmente, entre 2071-2100 y con mayor énfasis en SSP2-4,5.
- Los indicadores extremos aplicados muestran para todos los períodos futuros y en ambos escenarios climáticos analizados, respecto al período de referencia 1981-2010, un incremento de HsigFD

entre un 20-30% (70-110 eventos/año) y en el caso de HsigCD, con más de 2 casos/año, lo que indica que el clima marino cubano en función de Hsig estaría transitando a ser más extremo.

REFERENCIAS

- Appendini, C. M.; Torres, A.; Salles, P.; López, J. & Tonatiuh, E. 2014. "Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast". *Journal of Climate*, 27(4): 1619-1632. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1>.
- Appendini, C.; Ruiz, P.; Marsooli, R. & Cerezo, R. 2025. "Assessing the effects of climate change on the Gulf of Mexico wave climate using the COWCLIP framework and the PRECIS Regional Climate Model". *Ocean Modelling*, 194: 102486. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102486>.
- Badriana, M. R. & Lee, H. S. 2023. "Multimodel Ensemble Projections of Wave Climate in the Western North Pacific Using CMIP6 Marine Surface Winds". *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8): 835-851. <https://doi.org/10.3390/jmse9080835>.
- Baghanian, S. & Alizadeh, M. J. 2022. "Wave climate projection in the Persian Gulf: An ensemble of statistically downscaled CMIP6-GCMs". *Ocean Engineering*, 266: 112821-112837. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112821>.
- Camus, P.; Losada, I., J.; Izaguirre, C.; Menéndez, M. & Pérez, J. 2017. "Statistical wave climate projections for coastal impact assessments". *Earth's Future*, 5(3): 918-933. <https://doi.org/10.1002/2017EF000609>.
- Cannon, A., J.; Sobie, S., R. & Murdock, T., Q. 2015. "Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?". *Journal of Climate*, 28(13): 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.
- Cracknell, A., P. & Varostos, C., A. 2022. *Understanding Global Climate Change. Modelling the Climatic System and Human Impacts*. Second Edition ed., Boca Raton, US: Taylor & Francis Group, 427 p., ISBN: 978-0-429-20332-9.
- deCastro, M.; Rusu, L.; Arguilé, B.; Ribeiro, A.; Costoya, X.; Carvalho, D. & Gómez, M. 2024. "Different approaches to analyze the impact of future climate change on the exploitation of wave energy". *Renewable Energy*, 220: 119569-119591. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119569>.
- Dobrynin, M.; Murawsky, J.; Baehr, J. & Ilyina, T. 2015. "Detection and Attribution of Climate Change Signal in Ocean Wind Waves". *Journal of Climate*, 28(3): 1578-1591. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00664.1>.
- Gidden, M. J. and collaborators 2019. "Global emissions pathways under different socioeconomic

- scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century”. *Geoscientific Model Development*, 12(4): 1443-1475. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>.
- Hemer, M. A.; Wang, X. L.; Weisse, R. & Swail, V. R. 2012. “Advancing Wind-Waves Climate Science: The COWCLIP Project”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(6): 791-796. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00184.1>.
- Hernández, M.; Martínez, C. A. & Marzo, O. 2014. “Consequences of sea level variability and sea level rise for Cuban territory”. In: *Proceedings of the International Association Hydrological Sciences*, Gothenburg, Sweden, pp. 22-27. <https://doi.org/10.5194/piahs-365-22-2015>.
- Hidalgo, A. & Mitrani, I. 2024. “Projection of Significant Wave Height in Gulf of Mexico”. In: Torres, Y., Beltran, A. M., Felix, M., Peralta, E. & Larios, D. F. (eds.), *Recent Advances and Emerging Challenges in STEM. SPEMEPS 2023*, (ser. Springer Proceedings in Materials), vol. 50, Gewerbestrasse, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, pp. 526-536, ISBN: 978-3-031-64106-0. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64106-0_57, [Consulted: August 12, 2024].
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Pérez, G. 2023. “Detección de cambios en la altura de la ola significativa en las costas cubanas”. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(3): 1-11.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Vichot, A. 2024. “Projected wind and waves around the Cuban archipelago using a multimodel ensemble”. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(8): 7663-7677. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05093-4>.
- Iturralde, M., A. & Serrano, H. (eds.). 2015. *Peligros y vulnerabilidades de la zona marino-costera de Cuba: estado actual y perspectivas ante el cambio climático hasta el 2100*. La Habana: Editorial Academia, 72 p., ISBN: 978-959-270-338-4.
- Kaur, S.; Kumar, P.; Min, S. K.; Krishnan, A. & Wang, X. L. 2023. “Evaluation of COWCLIP2.0 Ocean wave extreme indices over the Indian Ocean”. *Climate Dynamics*, 61: 5747-5765. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06882-9>.
- Krishnan, A.; Bhaskaran, P. K. & Kumar, P. 2021. “CMIP5 model performance of significant wave heights over the Indian Ocean using COWCLIP datasets”. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(1): 377-392, ISSN: 1434-4483. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03642-9>.
- Lemos, G.; Menendez, M.; Semedo, A.; Camus, P.; Hemer, M.; Dobrynin, M. & Miranda, P. 2020. “On the need of bias correction methods for wave climate projections”. *Global and Planetary Change*, 186: 103109-103129. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103109>.
- Lemos, G.; Menendez, M.; Semedo, A.; Miranda, P. & Hemer, M. 2021. “On the decreases in North Atlantic significant wave heights from climate projections”. *Climate Dynamics*, 57: 2301-2324. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05807-8>.
- Lemos, G.; Semedo, A.; Kumar, R.; Dobrynin, M.; Akpınar, A.; Kamranzad, B.; Bidlot, J. & Lobeto, H. 2023. “Performance evaluation of a global CMIP6 single forcing, multi wave model ensemble of wave climate simulations”. *Ocean Modelling*, 184: 102237-102258. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102237>.
- Li, D.; Feng, J.; Xu, Z.; Yin, B.; Shi, H. & Qi, J. 2019. “Statistical Bias Correction for Simulated Wind Speeds Over CORDEX-East Asia”. *Earth and Space Science*, 6(2): 200-211. <https://doi.org/10.1029/2018EA000493>.
- Lira, A.; Berg, P.; Baquerizo, A. & Besio, G. 2023. “On the role of wave climate temporal variability in bias correction of GCM-RCM wave simulations”. *Climate Dynamics*, 61: 3541-3568. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06756-0>.
- Losada, I. J.; Acevedo, A.; Camus, P.; Díaz, P.; Espejo, A.; Menéndez, M.; Menéndez, P.; Ramírez, M.; Toimil, A.; Torres, S.; Maza, M. E. & Fuentes, M. 2018. *Reconstrucción histórica y proyecciones del efecto del cambio climático sobre el oleaje en la costa de Cuba*. (ser. Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe), Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 63 p., Disponible en: <https://www.cepal.org/fr/node/47206>, [Consultado: 17 de febrero de 2022].
- Maraun, D. and Widmann, M. 2018. *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 341 p., ISBN: 978-1-107-06605-2.
- Meucci, A.; Young, I. R.; Hemer, M.; Kirezci, E. & Ranasinghe, R. 2020. “Projected 21st century changes in extreme wind-wave events”. *Science Advances*, 6: eaaz7295. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz7295>.
- Meucci, A.; Young, I. R.; Trenham, C. & Hemer, M. 2024. “An 8-model ensemble of CMIP6- derived ocean surface wave climate”. *Scientific Data*, 11: 100-112. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-02932-x>.
- Mohan, S. & Bhaskaran, P. K. 2019. “Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region”. *Climate Dynamics*, 53: 5415-5435. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>.
- Morim, J.; Vitousek, S.; Hemer, M.; Reguero, B.; Erikson, L.; Casas-Prat, M.; Wang, X. L.; Semedo, A.; Mori, N.; Shimura, T.; Mentaschi, L. & Timmermans, B. 2021. “Global-scale changes to extreme ocean wave events due to anthropogenic warming”. *Environmental Research*

- Letters*, 16(7): 074056-0740565. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1013>.
- Noël, T.; Loukos, H.; Defrance, D.; Vrac, M. & Levavasseur, G. 2021. "A high-resolution downscaled CMIP5 projections dataset of essential surface climate variables over the globe coherent with the ERA5 reanalysis for climate change impact assessments". *Data in Brief*, 35: 106900-106916. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106900>.
- Parker, K. & Hill, D. F. 2017. "Evaluation of bias correction methods for wave modeling output". *Ocean Modelling*, 110: 52-65. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.12.008>.
- Pérez, J.; Menéndez, M.; Méndez, F., J. & Losada, I., J. 2014. "Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region". *Climate Dynamics*, 51: 2663-2680. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2078-8>.
- Pérez, R. 2019. "Climbing the sea level in Cuba due to Climate Change". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1): 76-83.
- Planos, E., O. & Gutiérrez, T., L. (eds.). 2020. *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. La Habana: AMA Sello Editorial, 402 p., ISBN: 978-959-300-170-0.
- Planos, E., O.; Rivero, R. & Guevara, V. (eds.). 2013. *Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*. La Habana: Editorial AMA, 430 p., ISBN: 978-959-300-039-0.
- Ramon, J.; Lledó, L.; Torralba, V.; Soret, A. & Doblas, F. J. 2019. "What global reanalysis best represents near-surface winds?". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(724): 3236-3251. <https://doi.org/10.1002/qj.3616>.
- Sardana, D.; Kumar, P.; Bhaskaran, P. K. & Nair, T. M. B. 2022. "The projected changes in extreme wave height indices over the Indian Ocean using COWCLIP2.0 datasets". *Climate Dynamics*, 61: 255-269. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06579-5>.
- Taniguchi, K. 2019. "Variations in Winter Ocean Wave Climate in the Japan Sea under the Global Warming Condition". *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5): 150-166. <https://doi.org/10.3390/jmse7050150>.
- Torma, C.; Giorgi, F. & Coppola, E. 2015. "Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain Precipitation over the Alps". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9): 3957-3972. <https://doi.org/10.1002/2014JD022781>.
- Wang, X. L.; Feng, Y. & Swail, V. R. 2014. "Changes in global ocean wave heights as projected using multimodel CMIP5 simulations". *Geophysical Research Letters*, 41: 1026-1034. <https://doi.org/10.1002/2013GL058650>.
- Wilks, D. S. 2019. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Fourth Edition ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier/Academic Press, 818 p., ISBN: 978-0-12-385022.
- Yadav, A.; Kumar, P.; Bhaskaran, P., K.; Hisaki, Y. & Ranji 2024. "Evaluation of ocean wave power utilizing COWCLIP 2.0 datasets: a CMIP5 model assessment". *Climate Dynamics*, 62: 9447-9468. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07402-z>.