

Detección de cambios en la altura de la ola significativa en las costas cubanas

Detection of change in the significant wave height in the Cuban coast



<https://cu-id.com/2377/v29n3e07>

 Axel Hidalgo Mayo^{1*},  Ida Mitrani Arenal²,  Graciela Pérez Rivas³

¹Universidad de Holguín, Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Cuba.

²Universidad de La Habana, Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicadas, Cuba.

³Universidad de Holguín, Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Cuba.

RESUMEN: El presente trabajo tiene como objetivo determinar los cambios de la altura de la ola significativa (Hsig) en las costas cubanas durante el período 1950-2022, como contribución a los estudios de variabilidad climática que se desarrollan en el país, en el marco de la Tarea Vida. Se emplearon los datos de Hsig provenientes del reanálisis ERA5 con resoluciones temporal de 6 h y espacial de 0.5° de latitud por ese orden, así como los índices NAO (Oscilación del Atlántico Norte, por sus siglas en inglés) y el ENOS (El Niño- Oscilación del Sur) referido al índice Niño3.4. Además, se aplicaron índices extremos para la detección del cambio climático referido a Hsig en el archipiélago cubano. Los resultados arrojan cambios estadísticamente significativos en el régimen normal de Hsig, para el 5% a partir de 1981 en todas las costas cubanas, excepto desde Cabo San Antonio hasta Punta Maternillos; así como una tendencia lineal anual creciente de Hsig en todas las costas cubanas hasta 0.002 m/año. Se concluye que la variabilidad interanual de Hsig en las costas cubanas tiene una mayor correlación con la NAO, fundamentalmente, en ambas costas de la región oriental; mientras que en la multianual el ENOS tiene mayor influencia, pero está se refleja básicamente en la costa sur cubana. Por su parte, los indicadores extremos de cambio climático muestran que el clima marino cubano referido a Hsig a partir de 1991 está transitado a ser más extremo.

Palabras claves: indicadores extremos de cambio climático, altura de ola significativa, variabilidad climática, COWPLIP.

ABSTRACT: The objective of this work is to determine the changes of the significant wave height (Hsig) in the Cuban shore area during the period 1950-2022, as a contribution to the studies of climate variability that are developed in the country, within the framework of the Task Life. The Hsig data from the ERA5 reanalysis were used with temporal resolution of 6 h and spatial resolution of 0.5° of latitude in that order, as well as the NAO (North Atlantic Oscillation) and ENSO (El Niño-South Oscillation) index. The last one is referred to the Niño3.4 index. Besides, extreme indices were applied for the detection of climate change referred to Hsig in the Cuban archipelago. The results show statistically significant changes in the habitual Hsig regime, around the 5% from 1981 on all the Cuban shore perimeter, except from Cabo San Antonio to Punta Maternillos, as well as an increasing annual linear trend of Hsig in all the Cuban coasts up to 0.002 m/year. It is concluded that the interannual variability of Hsig in the Cuban coasts has a higher correlation with the NAO, fundamentally, in both coasts of the eastern region, while from the multiannual ENSO has a greater influence, but it is basically reflected in the southern Cuban coast. On another hand, the extreme indicators of climate change show that the Cuban marine climate referred to Hsig from 1991 is becoming more extreme.

Key words: extreme climate change index, significant wave height, climate variability, COWCLIP.

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

Recibido: 01/06/2023

Aceptado: 31/07/2023

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 su análisis e interpretación. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.** Ida Mitrani Arenal. **Participó en el análisis de los resultados y en la revisión del manuscrito.** Graciela Pérez Rivas. **Participó en el análisis de los resultados y 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 adaptación al cambio climático es uno de los mayores retos de esta época y sus efectos adversos menoscaban la capacidad de todos los países para alcanzar el desarrollo sostenible. Su carácter global exige la máxima cooperación internacional para acelerar la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) y abordar la adaptación de sus efectos adversos. En este sentido, la Organización de Naciones Unidas (ONU) aprobó en 2015 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la cual en su objetivo 13 exhorta a todos los gobiernos a “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2015).

A partir de los resultados obtenidos en el Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2008), relacionados con el ascenso del nivel medio del mar, la proyección de clima marino (se hace referencia a los regímenes de viento y Hsig) ha despertado un marcado interés de la comunidad científica a nivel internacional. Con el objetivo de fomentar este tipo de estudios el IPCC, el Comité Oceanográfico Internacional (COI, por sus siglas en inglés) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) aunaron esfuerzos en la creación de una plataforma para el perfeccionamiento de estas investigaciones denominada COWCLIP (Proyecto Coordinado para la proyección del clima marino, por sus siglas en inglés) (Hemer *et al.*, 2012), el cual incluye, además de las proyecciones de los regímenes normales y extremos de viento y Hsig, estudios relacionados con la variabilidad climática de estas dos variables.

A nivel global, a partir del proyecto COWCLIP, destacan los trabajos de (Mori *et al.*, 2010; Jevrejeva *et al.*, 2012; Hemer *et al.*, 2013; Camus *et al.*, 2014, 2017; Fan *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Dobrynin *et al.*, 2015; Goodwin *et al.*, 2017; Lemos *et al.*, 2020; Cousineau & Murphy, 2022; Lakku & Behera, 2022); siendo las regiones más estudiadas a nivel mundial el Atlántico Norte y el Océano Pacífico, seguidas por el Mar del Norte y el Mar Mediterráneo. En la versión 2.0 de este proyecto, (Morim *et al.*, 2021) aplicaron índices extremos de cambio climático de Hsig para el océano mundial; mientras que (Sardana *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2023) lo hicieron para el Océano Índico.

Referidos particularmente al Atlántico Norte, (Wang *et al.*, 2012) analizaron la tendencia de Hsig durante el período 1871-2010, por intermedio de un modelo de regresión lineal múltiple empleando la presión a nivel medio del mar (slp) como predictor, encontrando un incremento de esta variable en el Noreste del Atlántico y una disminución en latitudes medias. Por su parte, (Bertin *et al.*, 2013) obtuvieron resultados similares al de los autores anteriores, al determinar un incremento del oleaje de 0.01 m/año por encima de los 50°N. Por otro lado, (Martínez *et al.*, 2016) estu-

diaron la influencia de índices de circulación global en el clima marino determinando que el más importante es la NAO, así como que en latitudes inferiores a los 24°N no se puede discernir claramente la separación entre el mar de viento y el de leva.

Para el mar Caribe, (Bernal *et al.*, 2016) modelaron los oleajes superiores a 5 m durante el período 1978-2011 así como su incidencia en los ecosistemas costeros de Colombia. En tanto, (Devis *et al.*, 2017) realizaron una valoración de los regímenes extremos de viento y oleaje correlacionando los mismos con el Chorro del Caribe de Niveles Bajos y los frentes fríos durante el período 1979-2014. Por su parte, (Mitrani *et al.*, 2017) estudiaron el aumento del poder destructivo de los huracanes que han afectado a Cuba y mares adyacentes, lo cual es consecuencia, según estos autores, de los cambios en la estructura termohalina (aumento de la temperatura del agua en los primeros 500 m de profundidad y de la salinidad).

En el caso de Cuba, las investigaciones sobre los regímenes de Hsig han sido dispersos en el tiempo, y a su vez basadas en los regímenes de viento, producto de la inexistencia de mediciones directas de Hsig en el entorno de las costas cubanas. Estos estudios se han enmarcado, fundamentalmente, en los regímenes extremos y no en los regímenes normales de Hsig, los cuales han sido muy poco estudiados, en buena medida por la ausencia de mediciones continuas de esta variable y la capacidad de cómputo necesaria para realizar estimaciones de esta variable para largos períodos de tiempo.

Entre las principales investigaciones realizadas en Cuba, se pueden mencionar el caso de (Salas & Mitrani, 1992), los cuales calcularon el campo de olas asociados a los huracanes Juan (1985), Kate (1985), Floyd (1987) y Gilbert (1988). Por su parte, (Salas *et al.*, 1992) estudiaron el campo de olas y el viento máximo para el litoral sur oriental de Cuba, a partir de los datos de viento de la estación meteorológica Cabo Cruz; en tanto, (Mitrani *et al.*, 1999) desarrollaron técnicas para la estimación de los regímenes extremos de viento y oleaje para todas las costas cubanas. En el caso de (Pérez *et al.*, 2001; Casals, 2004; Hidalgo *et al.*, 2019), a partir de las formulaciones descritas en (USACE, 1984, 2006), estudiaron los regímenes extremos de Hsig para la Península de Guanahacabibes, Cayo Largo del Sur y la región nororiental de Cuba por ese orden.

Lo anterior conduce a que el objetivo de la presente investigación radique en aplicar indicadores de extremos climáticos referidos a Hsig que permitan la detección del cambio climático en las costas cubanas y estudiar la variabilidad climática multianual de esta variable, a partir de las fuentes de información disponibles para Cuba y mediante la utilización de métodos estadísticos actualizados empleados por parte de la comunidad científica internacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En la [figura](#) siguiente se presenta la batimetría de los mares adyacentes a Cuba, así como los tramos costeros del archipiélago cubano empleados por ([Hidalgo et al., 2017](#)); aunque esta área no refleja las zonas generadoras de oleaje que afectan a Cuba (dominio 10°N-30°N y 60°W-100°W), tal y como lo utilizaron varios autores cubanos ([Mitrani et al., 2013, 2019](#)), sino solamente las particularidades de las aguas costeras y someras, como áreas de transformación del oleaje procedente de aguas profundas. Esta selección tiene la finalidad de representar con una alta resolución el clima marino cubano, referido a los regímenes normales y extremos de Hsig.

La República de Cuba es un archipiélago formado por la Isla de Cuba, la Isla de la Juventud, y más de 1600 islas, islotes y cayos. La superficie de tierra firme, alcanza los 10757.06 km² y la de los cayos adyacentes 3126.41 km², se encuentra sobre una meseta que bordea la isla mayor, denominada plataforma insular cubana la cual tiene una superficie de 67832 km² ([Instituto de Geografía Tropical, 2019](#)).

El archipiélago cubano en su costa norte presenta un predominio de una costa abrupta muy pronunciada y plataforma estrecha, excepto en los tramos costeros Cabo San Antonio-Punta Gobernadora y Punta Hicacos-Punta Maternillos, donde se localizan las cayerías Los Colorados y Sabana-Camagüey. La costa sur se caracteriza por ser más irregular, mostrando el predominio de plataforma ancha con profundidades bajas y cenagosas, con excepción de los tramos costeros: Punta de Maisí-Cabo Cruz, Punta María Aguilar-Golfo de Cazones y el Sur del Archipiélago de los Canarreos y la Isla de la Juventud ([Instituto de Geografía Tropical, 2019](#)).

Los tramos costeros considerados en la presente investigación obedecen a las condiciones físico-geográficas del archipiélago cubano, mientras que la estratificación de las costas está basada en los fenómenos meteorológicos que causan inundaciones costeras en Cuba ([Hidalgo et al., 2017](#)).

Descripción de los datos

Los reanálisis atmosféricos son largas reconstrucciones climáticas históricas que pueden ser considerados como datos cuasi-reales, dado que integran diferentes mediciones, tales como: estaciones de superficie y de aire superior, boyas, barcos, satélites y radares meteorológicos. En esta investigación se empleó los datos de Hsig provenientes del reanálisis ERA5 para los cuatros horarios sinópticos (00Z, 06Z, 12Z y 18Z) y con resolución espacial de 0.50° de latitud (aproximadamente 55 km), durante el período 1950-2022, los cuales están disponible en formato netCDF (.nc) en la página web <http://cds.climate.copernicus.eu> ([Copernicus Climate Change Service, 2017](#)).

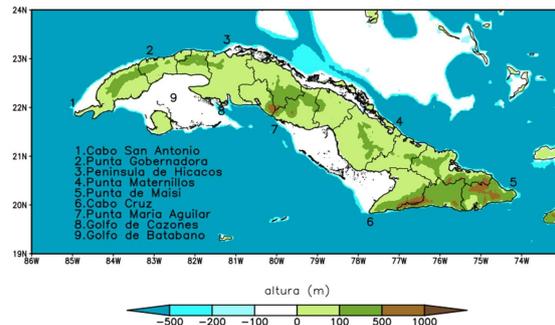


Figura 1. Topografía y tramos costeros del archipiélago cubano empleados en la presente investigación. Elaborado a partir de ([GEBCO, 2014](#)).

Además, se emplearon los datos de los índices de teleconexión NAO y ENOS, este último para índice Niño3.4, igualmente entre 1950-2022, disponibles en la página web del Centro para la Predicción Climática de los Estados Unidos (CPC, por sus siglas en inglés) <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>. El índice NAO está basado en la diferencia de la presión a nivel del mar entre la Baja de Islandia y el Anticiclón Subtropical de las Azores Bermudas, reflejando las fases positivas valores de presión por encima de lo normal en el Atlántico Norte Central y el Este de los Estados Unidos. Por su parte, el ENOS referido al índice Niño3.4 muestra las anomalías de temperatura superficial del mar para el Pacífico Ecuatorial (5°S-5°N y 170°W-120°W), siendo considerado el evento de teleconexión de mayor influencia en los cambios del clima para diferentes regiones del planeta, particularmente en la zona tropical ([Pérez, 2011](#)).

Por último, el proceso de cálculo y cartografía se realizó mediante la combinación de los softwares Grads ([COLA, 2018](#)), CDO ([Schulzweida, 2020](#)) y RStudio ([R Core Team, 2022](#)) todos sobre el sistema operativo Linux.

Análisis del cambio de los regímenes normales de Hsig

Para determinar si los valores medios anuales de Hsig de las normales climáticas (1951-1980, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020) son similares a la 1961-1990, la cual se ha empleado como referencia en estudios de variabilidad climática y cambio climático realizados en Cuba ([Planos et al., 2013](#); [Planos & Gutiérrez, 2020](#); [González et al., 2023](#)), se aplicó la prueba de hipótesis de diferencia de dos medias por la siguiente expresión ([Wilks, 2019](#)), asumiendo varianzas poblacionales conocidas:

$$Z = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}} \quad (1)$$

Donde: $n_A, n_B, \bar{x}_A, \bar{x}_B, s_A^2, s_B^2$ son el tamaño de la muestra, la media y la varianza respectivamente. Los subíndices A y B denotan dos períodos diferentes.

La hipótesis nula planteada (las medias de ambos períodos son similares), se rechazan para un nivel de significación del 5%, si $|Z| > 1.96$.

Índices extremos de cambio climático para área oceánicas

Reciente en el proyecto COWCLIP en su versión 2.0 (Morim *et al.*, 2021), emplearon índices climáticos extremos para la detección y atribución del cambio climático en el clima marino futuro a partir de los desarrollados por el ETCCDI (Grupo de Expertos sobre Índices y Detección de Cambio Climático, por sus siglas en inglés), pertenecientes al Programa Mundial de Investigaciones sobre el Clima (WCRP, por sus siglas en inglés), en base a Hsig. Según (Morim *et al.*, 2021) estos índices son:

- Frecuencia anual de días donde Hsig es superior al 90 percentil por encima del período base.
- Número de veces donde al menos dos días consecutivos Hsig > 90 percentil por encima del período base.

Estos índices resumen las características fundamentales de las olas oceánicas extremas, por lo que se consideran tienen una importancia sustancial en el análisis de los cambios en los extremos climáticos. En la bibliografía disponible y consultada, únicamente (Morim *et al.*, 2021) estudiaron el comportamiento de los índices para el cambio de Hsig para el océano mundial y (Sardana *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2023) lo hicieron para el Océano Índico. Estos indicadores extremos para la detección del cambio climático constituyen un importante paso de avance en el conocimiento científico sobre esta temática en áreas oceánicas.

RESULTADOS

Variabilidad climática de Hsig en las costas cubanas

La variabilidad interanual de Hsig en las costas cubanas (figura 2, izquierda) muestra los mayores valores durante el período poco lluvioso (PPLL), particularmente, entre noviembre y marzo donde esta variable excede el metro de altura producto de la influencia de las bajas extratropicales y los anticiclones migratorios que afectan a Cuba en esta época del año. Los mayores valores se alcanzan en durante el mes de febrero con 1.6 m, producto al incremento en frecuencia e intensidad de los sistemas meteorológicos de la escala sinóptica antes mencionados; mientras los mínimos se registran en agosto y septiembre con magnitudes inferiores a 0.8 m, producto a los débiles gradientes de presión que impone el anticiclón subtropical de la Azores- Bermudas sobre este bimestre en los mares adyacentes al territorio cubano.

En el caso de la variabilidad multianual de Hsig está determinada por diferentes factores, entre estos índices de teleconexión como el ENOS y la NAO. El comportamiento por años muestra un cambio en la serie anual (figura 2, derecha) a partir del año 1996, aunque este no es estadísticamente significativo, presentando un promedio de 0.98 m entre 1950-1995 y 1.05 m a partir de 1996, comportándose esta magnitud solamente por debajo de 1 m en los años 2018 y 2020.

En las costas cubanas se aprecia para todas las normales climáticas (figura 3) una Hsig durante todo el año inferior a un metro, con excepción de la costa nororiental donde esta variable excede la unidad. En el caso del régimen extremo referido al 90th percentil los mayores valores ocurren en el extremo más oriental del país, no observándose cambios apreciables en el resto de las costas cubanas.

Particularmente, para la norma climática 1961-1990 la cual fue empleada como línea base para los estudios de variabilidad y cambios en el clima marino cubano referidos a Hsig, presenta para el régimen medio anual

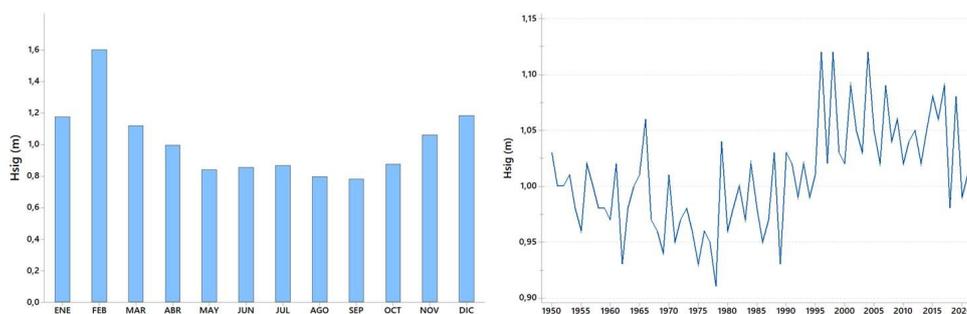


Figura 2. Variabilidad de Hsig interanual (izquierda) referidas al período 1961-1990 y multianual (derecha) en las costas cubanas. Elaboración propia a partir del reanálisis ERA5.

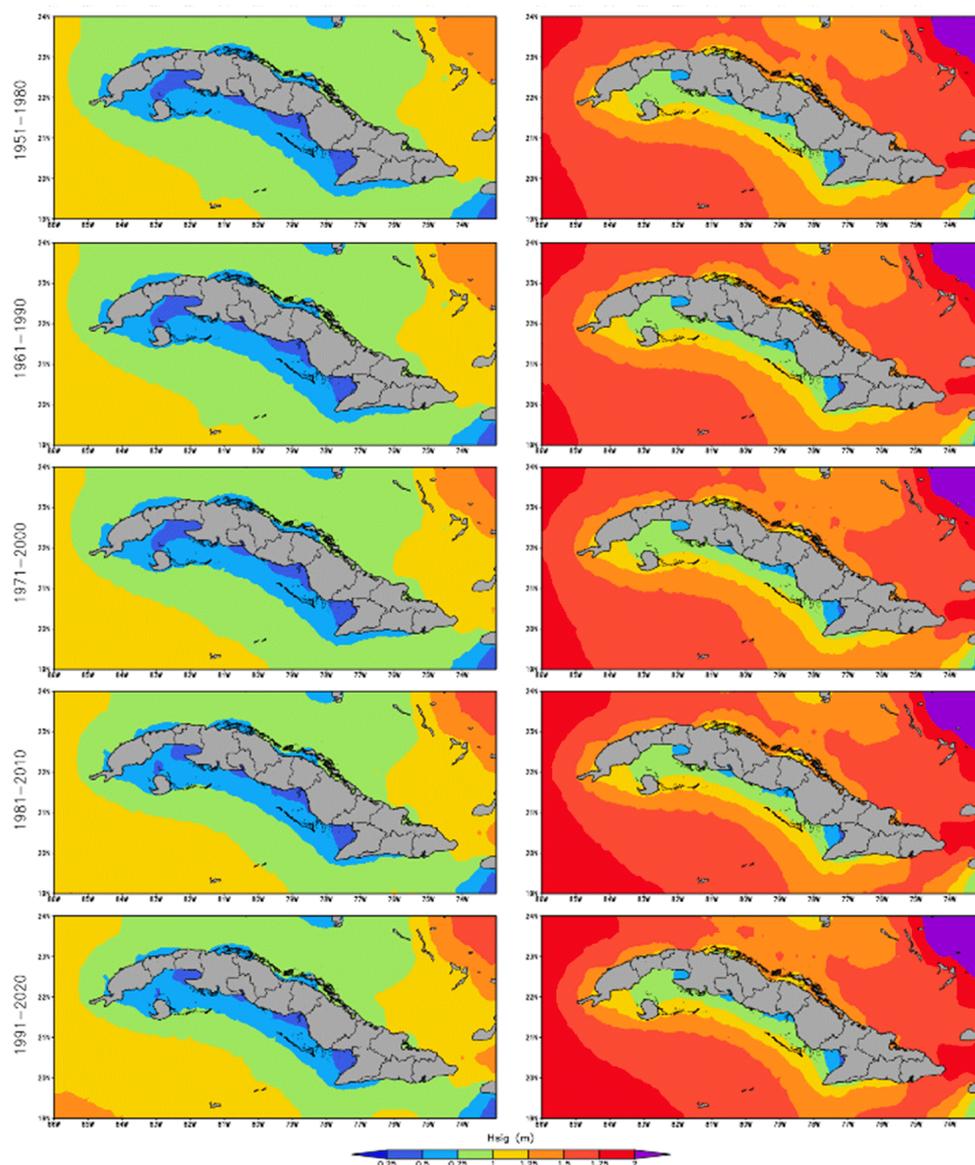


Figura 3. Altura de la ola significativa para diferentes normas climáticas en las aguas cubanas. La columna de izquierda representa el régimen normal y la derecha el extremo, referida al 90th percentil.

valores inferiores a un metro en todas las costas cubanas, excepto en el extremo norte oriental de país. Por su parte, los valores extremos de Hsig referidos al 90th percentil, muestran valores superiores a 1.5 m en la costa nororiental, mientras que los registros inferiores a un metro se localizan la plataforma Sur del archipiélago cubano.

Las diferencias de Hsig media anual para los períodos 1981-2010 y 1991-2020 respecto a la línea base 1961-1990, muestran cambios estadísticamente significativos para el nivel de significación del 5% en todos los mares adyacentes a Cuba, excepto los ubicados en la costa norte de las regiones central y occidental. Estas diferencias de los valores medios anuales son más marcados para la norma climática 1991-2020, ya que la misma se encuentra enmarcada dentro de un período de alta ciclónica en el mar Caribe y el golfo de México (Ballester *et al.*, 2010; Sealy & Strobl, 2017).

Para el archipiélago cubano, Hsig tiene una tendencia lineal creciente, aunque en ninguno de los casos es estadísticamente significativa para el 5%, presentando valores hasta 0.002 m/año. Estos valores son de igual magnitud a los obtenidos por (Bertin *et al.*, 2013) durante el período 1900-2010, los cuales determinaron que para el Atlántico Norte son del orden de 0.0025-0.0075 m/año. En el caso del régimen extremo los mayores valores se observan en los mares al Sur de Cuba con valores superiores a 0.002 m/año.

La correlación espacial entre ambos índices de teleconexión (NAO y ENOS) y Hsig media mensual presenta las mayores asociaciones para la NAO, fundamentalmente, para la costa norte de región oriental y central con valores que superan a 0.15, siendo más marcados y con magnitudes que exceden a 0.20 en el extremo más oriental y en la costa occidental de Holguín. Esta relación está dada porque los valores

de Hsig en ambas regiones están relacionados con los trenes de olas que se generan en el Atlántico Norte y se relacionan con la intensificación del Anticiclón

Subtropical de las Azores-Bermudas. Por su parte, las correlaciones de Hsig con relación al evento ENOS no muestran valores significativos.

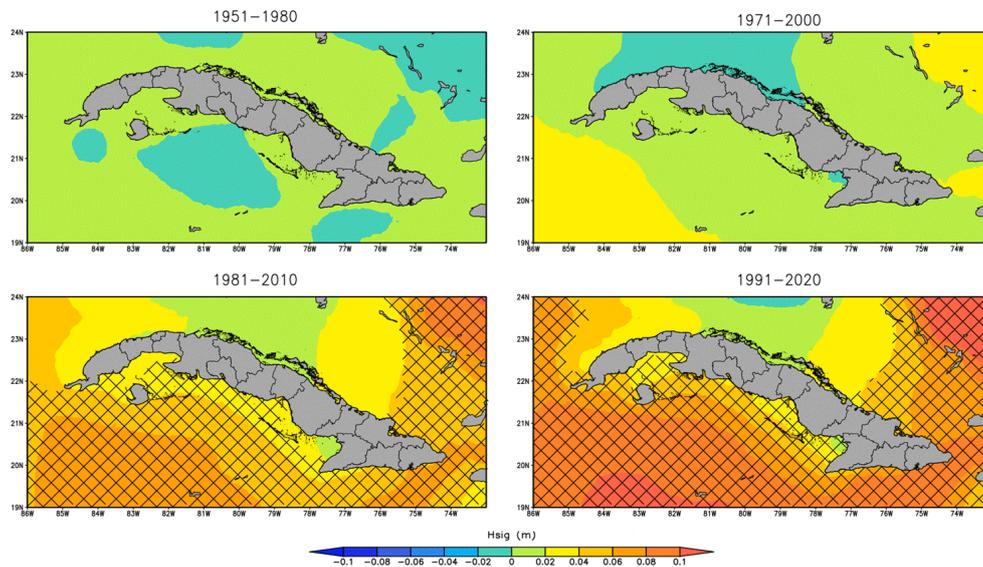


Figura 4. Cambios de Hsig para diferentes normas climáticas respecto al periodo de referencia 1961-1990. Las zonas sombreadas representan áreas donde el cambio es estadísticamente significativo para el 5%.

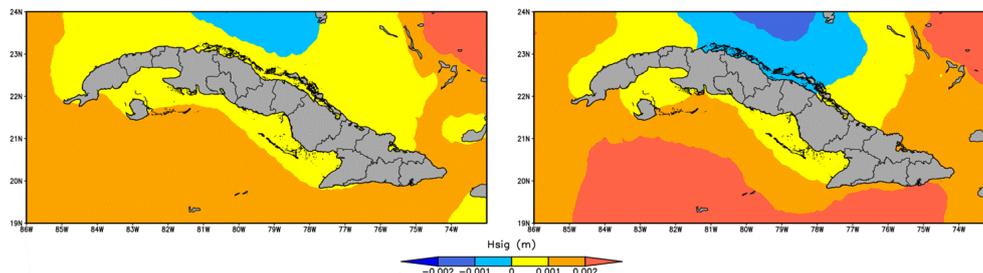


Figura 5. Tendencia lineal de Hsig (m/año) referido al régimen medio (izquierda) y 90th percentil (derecha), en las costas cubanas calculada para el periodo 1950-2022.

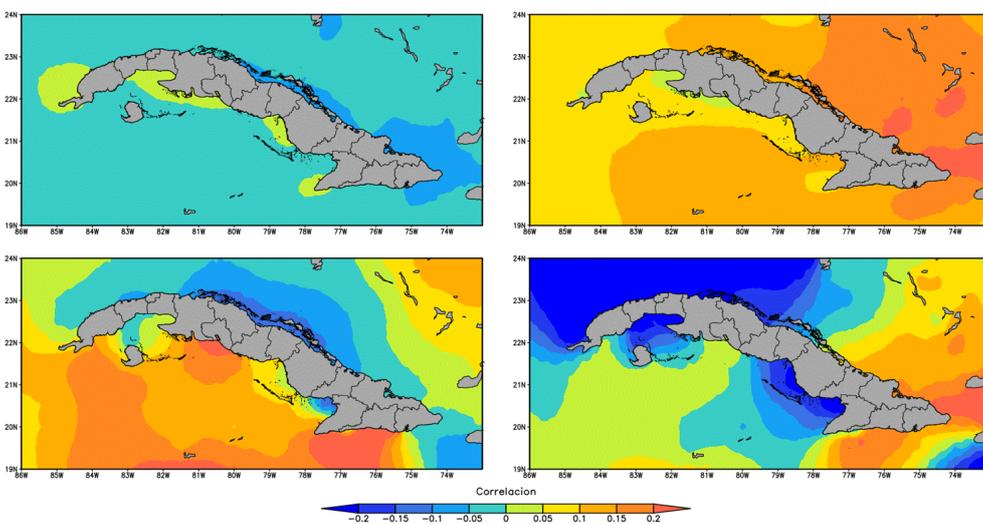


Figura 6. Correlación entre variabilidad interanual (fila superior) y multianual (fila inferior) de Hsig con los índices Niño3.4 (columna izquierda) y NAO (columna derecha) durante el periodo 1950-2022.

En el caso de la variabilidad multianual de Hsig el evento ENOS presenta mayores correlaciones para la costa sur cubana con valores que exceden 0.2 en la región suroriental del país. En tanto, la NAO muestra, al igual que en la variabilidad interanual, una mayor correspondencia en ambas costas de la región oriental, presentando los mayores valores en el extremo oriental cubano con magnitudes superiores a 0.2. Destaca, además, en el caso de la NAO la correlación inversa que presenta con Hsig en la costa noroccidental de Cuba y las costas poco profundas del golfo de Batabanó y el tramo costero Cabo Cruz- Punta de María Aguilar.

Aunque en la variabilidad multianual la NAO tiene una influencia más marcada en el comportamiento de Hsig en el entorno de las costas cubanas, es el caso del evento ENOS en su fase positiva quien ocasiona una mayor variabilidad interanual. Estos resultados se pueden apreciar para los eventos ENOS 1997-98 y 2015-16 (ver [figura 7](#)), ambos fuertes y con una extensión temporal entre septiembre y febrero con intensidades de 2.27 y 2.39 respectivamente. Ambos eventos muestran un comportamiento espacial diferente, presentando el 1997-98 mayores anomalías desde el punto de vista espacial en todas las costas cubanas con valores superiores a 0.05 m, excepto en el Golfo de Guacanayabo, y la costa norte de las provincias de Artemisa, Matanzas y Villa Clara. En el caso del 2015-16, aunque de mayor intensidad, las anomalías más representativas se localizan en ambas costas orientales con valores superiores a 0.15 m; mientras que en el resto de las costas cubanas estos valores fueron inferiores a 0.1 m. En este último evento, destaca en el extremo NE de Las Bahamas una zona con valores superiores a 0.2 m, lo que refleja la intensidad de los anticiclones migratorios y el descenso de las bajas extratropicales producto de que en presencia del evento ENOS el Chorro Subtropical desciende en latitud, provocando que estos fenómenos transiten más cerca del territorio cubano.

Además, de los eventos ENOS fuertes antes mencionados, la serie 1950-2022 presenta además el evento 1982-83, aunque este con la particularidad de ser menos intenso (2.08) y presentar menor duración temporal (octubre-febrero). Las anomalías del evento ENOS 1982-83 no presentaron valores notables como los ocurridos en 1997-98 y 2015-2016, mostrando so-

lamente valores positivos en ambas costas orientales, aunque inferiores a 0.05 m.

Indicadores extremos de Hsig en las costas cubanas

Los indicadores extremos de Hsig referidos a la frecuencia de días superiores al 90th percentil respecto al período de referencia 1961-1990, presentan las mayores diferencias para las normales climáticas 1981-2010 y 1991-2020 en todas las costas cubanas, excepto en la norte central, la suroriental y el tramo costero Cabo Cruz- Punta María Aguilar. Por su parte, los días consecutivos con esta condición se localizan en el extremo occidental, igualmente para los períodos 1981-2010 y 1991-2020. De forma general, estos indicadores reflejan que el clima marino referido a Hsig está transitando a ser más extremo.

DISCUSIÓN

Dentro de la variabilidad multianual de Hsig en las costas cubanas, el cambio de esta variable a partir de 1996 está relacionado con el incremento de la actividad ciclónica en la Región IV de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la cual incluye el golfo de México, el mar Caribe y el Océano Atlántico Norte, la cual ha sido descrita por diferentes autores ([Ballesster et al., 2010](#); [Sealy & Strobl, 2017](#)). En el caso particular del malecón habanero en la década de 90' del siglo XX se han incrementado los eventos de extremos de Hsig que han ocasionado inundaciones costeras ([Hidalgo et al., 2016](#)), producto de la afectación frentes fríos, ejemplo de ello fue la Tormenta del Siglo ocurrida el 13 de marzo de 1993 ([Mitrani et al., 2017](#)). Referido específicamente al cambio de Hsig producto de la actividad ciclónica en el mar Caribe, ([Montoya et al., 2018](#)) encontraron un incremento de los valores de Hsig superiores a 3.3 m en el período 1996-2012 con una frecuencia media de 0.82 eventos/año, muy superior a la ocurrida entre 1980-1995 (0.28 eventos/año).

Los resultados obtenidos en este artículo son coherentes con los determinados por ([Montoya et al., 2018](#)) referidos al cambio de Hsig a partir de 1996, aunque estos son de menor magnitud, debido a que estos autores emplearon en su análisis el punto de reji-

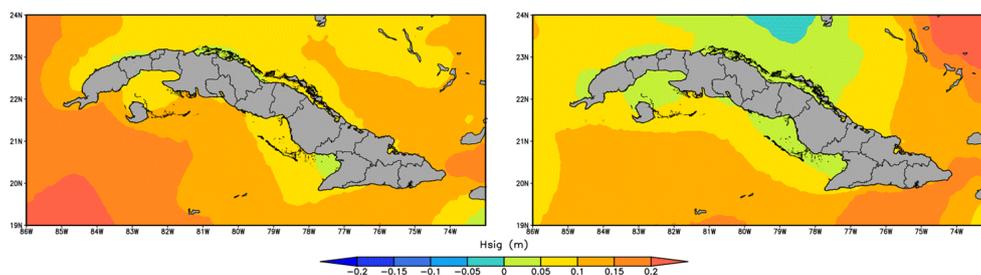


Figura 7. Anomalías Hsig media mensual durante las fases positivas fuertes de los eventos ENOS 1997-98 (izquierda) y 2015-16 (derecha) respecto a la norma climática 1961-1990.

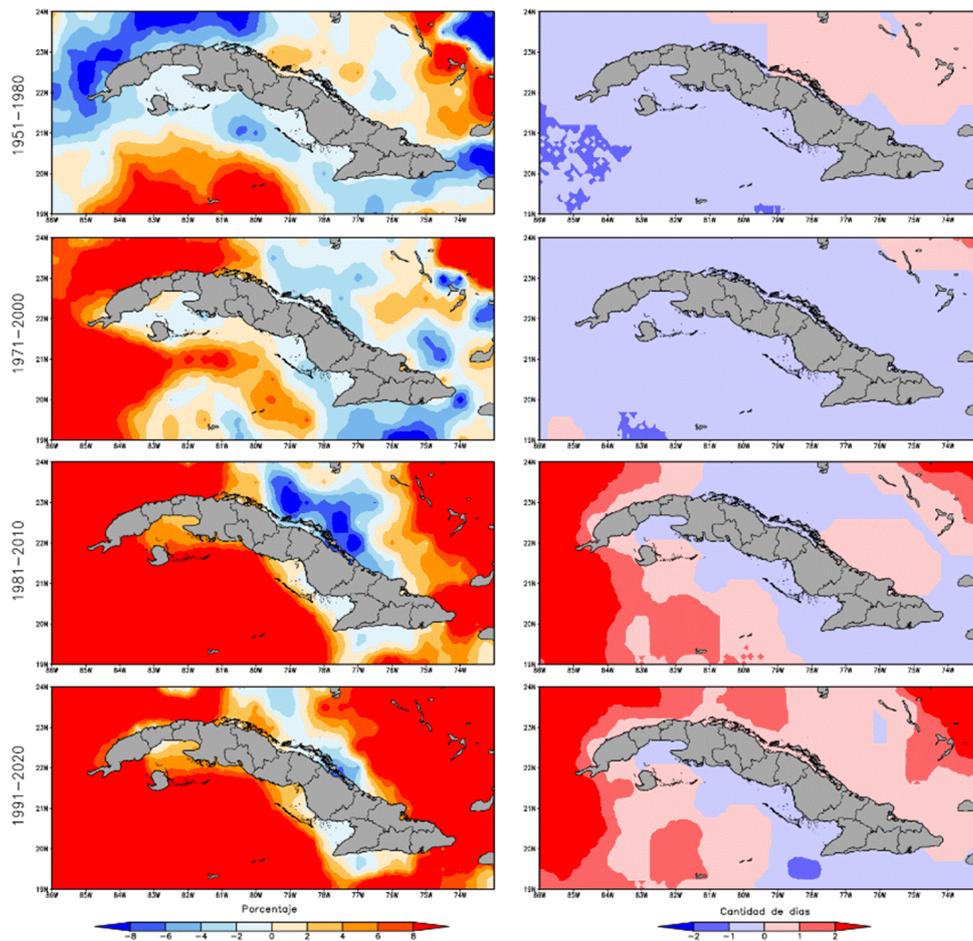


Figura 8. Indicadores extremos de cambio climático para diferentes normas climáticas respecto al periodo de referencia 1961-1990. La columna de la izquierda representa el porciento de días con Hsig por encima 90th percentil, y la de derecha los días consecutivos con esta condición.

lla 16°N-75°W, el cual se encuentra en el mar Caribe central y no presenta influencia del fondo marino y cuenta con un *fetch* geográfico de Este a Oeste (más de 1400 km) que favorece el desarrollo del oleaje. En el caso de los resultados presentados para las costas cubanas se tomó la media del campo de Hsig en los mares adyacentes a Cuba, estando estos valores bajo la influencia de zonas de pendiente suave como el golfo de Batabanó y el tramo costero Cabo Cruz- Punta de María Aguilar que provocan que los valores de Hsig tengan valores inferiores a los de aguas profundas.

Los cambios estadísticamente significativos de Hsig, para el nivel de significación del 5%, en los mares adyacentes a Cuba para el periodo 1991-2020, respecto a la línea base 1961-1990, igualmente reflejan el tránsito del clima marino cubano referido a Hsig a ser más extremo y está a tono con el incremento de la actividad ciclónica en la Región IV de la OMM descrita por (Ballester *et al.*, 2010). Este resultado coincide con la tendencia lineal creciente anual de Hsig, la cual, aunque no es estadísticamente significativa, presenta valores entre 0.001-0.002 m/año para el régimen normal y superior a 0.002 m/año para los regímenes extremos referidos al 90th percentil de Hsig

en el mar Caribe. Estos valores son de igual orden a los obtenidos por (Bertin *et al.*, 2013) durante el periodo 1900-2010, pero para el Atlántico Norte.

Aunque a partir de 1991 no se observan cambios estadísticamente significativos para el 5% en el régimen normal de Hsig desde Cabo San Antonio hasta Punta Maternillos, es justo este dentro de estos tramos costeros donde se han registrado los oleajes más fuertes, particularmente en el malecón habanero, al paso de la Tormenta del Siglo en 1993 y el huracán Wilma en 2005.

Por otro lado, los indicadores extremos de Hsig para la detección del cambio climático referidos a la frecuencia de días con Hsig superior al 90th percentil y los días consecutivos con esta condición, también presentan un incremento para la normal climática 1991-2020 respecto al periodo base 1961-1990. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que el clima marino cubano referido a Hsig está transitado a ser más extremo. Los mencionados indicadores utilizados en este trabajo, aunque en la bibliografía consultada han sido aplicados solamente para estudios de proyecciones climáticas de Hsig (Morim *et al.*, 2021; Sardana *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2023), mostraron su validez en estudios de variabilidad climática multianual.

Por último, la correlación multianual obtenida entre Hsig y el evento ENOS para la costa sur cubana, es coherente con los resultados obtenidos por (Vega *et al.*, 2020) para el mar Caribe; aunque estos autores analizaron, además, la influencia de forma independiente de las tres fases del ENOS (cálida, fría y neutra) con el comportamiento de Hsig. Por otro lado, el evento ENOS en su fase cálida, además, tiene una marcada influencia en la variabilidad interanual de Hsig en las costas cubanas, siendo los ejemplos más fehacientes los eventos 1997-98 y 2015-16, los cuales, aunque presentaron una extensión temporal similar entre septiembre y febrero, pero de intensidades diferentes, 2.27 y 2.39 por ese orden; las anomalías espaciales de Hsig tuvieron mayor extensión en el primero, pero fueron más intensas en el segundo. Estos últimos resultados pudieran formar parte de nuevas investigaciones en el campo de la variabilidad interanual de Hsig, teniendo en cuenta la complejidad del evento ENOS.

CONCLUSIONES

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

1. Para las normas climáticas 1981-2010 y 1991-2020, todos los tramos costeros cubanos, excepto desde Cabo San Antonio hasta Punta Maternillos, presentan cambios estadísticamente significativos en Hsig anual para el 5%, respecto al período base 1961-1990. Las diferencias más marcadas se localizan en extremo oriental del país son valores entre 0.08-0.1 m.
2. Todas las costas cubanas presentan una tendencia lineal creciente de Hsig hasta 0.002 m/año, aunque no estadísticamente significativo al 5%, siendo estos valores de igual magnitud a los encontrados por diferentes autores para Atlántico Norte, lo que indica que estas variaciones se deben a los cambios en intensidad de los fenómenos meteorológicos que rigen el tiempo y el clima sobre Cuba.
3. La variabilidad interanual de Hsig en las costas cubanas tiene una mayor correlación con la NAO, fundamentalmente, en ambas costas de la región oriental con valores que exceden 0.15; sin embargo, el evento ENOS en sus fases fuertes positivas provoca mayores anomalías en las costas cubanas, fundamentalmente, en ambas costas orientales. En el caso de variabilidad multianual el ENOS tiene mayor influencia en el comportamiento de Hsig, pero está se refleja mayoritariamente en la costa sur cubana, presentando las mayores asociaciones en la costa suroriental con valores que exceden 0.2.
4. De forma general, los resultados obtenidos en esta investigación, muestran cambios en la variabilidad multianual de Hsig a partir del uso de diferentes métodos estadísticos, lo que indica el tránsito del clima marino cubano referido a Hsig a ser más extremo.
5. Los cambios antes descritos, no indican la posibilidad de frecuente aparición de oleaje peligroso para bañistas o actividades náuticas de recreación, salvo en presencia de eventos meteorológicos severos, puesto que como promedio Hsig no alcanzaría más allá de 1.5 m en la zona de máximo, que es el área nororiental. Tampoco sería aprovechable como fuente alternativa de electricidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto de Meteorología y al Programa de Investigaciones “Adaptación y Mitigación del Cambio Climático” de la República de Cuba, por aprobar y financiar el proyecto “Detección de cambios en el clima marino cubano a partir de índices extremos de cambio climático”, en el marco del cual se obtuvieron los resultados que se presentan en el presente artículo científico.

REFERENCIAS

- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 2010. *Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico*. La Habana: Editorial Academia, 170 p., ISBN: 978-959-270-175-5.
- Bernal, G.; Osorio, A.; Urrego, L.; Peláez, D.; Molina, E.; Zea, S.; Montoya, R. D. & Villegas, N. 2016. “Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems”. *Journal of Marine Systems*, 164: 85-100, DOI: [10.1016/j.jmarsys.2016.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.007).
- Bertin, X.; Proteau, E. & Letetrel, C. 2013. “A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century”. *Global and Planetary Change*, 106: 77-83, DOI: [10.1016/j.gloplacha.2013.03.009](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.03.009).
- 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, DOI: [10.1002/2017EF000609](https://doi.org/10.1002/2017EF000609).
- Camus, P.; Menéndez, M.; Méndez, F. J.; Izaguirre, C.; Espejo, A.; Cánovas, V.; Pérez, J.; Rueda, A.; Losada, I. J. & Medina, R. 2014. “A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119: 1-17, DOI: [10.1002/2014JC010141](https://doi.org/10.1002/2014JC010141).
- Casals, R. 2004. “Los Procesos de Transformación del Oleaje e Incrementos del Nivel Medio del Mar en Cayo Largo del Sur, Archipiélago de los Canarreos”. *Revista Cubana de Meteorología*, 11(2): 74-84.

- COLA 2018. *Grid Analysis and Display System (Grads)*. Version 2.2.1, [Linux], Virginia, US: The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies.
- Copernicus Climate Change Service. 2017. *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Copernicus Climate Change Service Climate Data Store, Available: <http://cds.climate.copernicus.eu>, [Consulted: June 23, 2023].
- Cousineau, J. & Murphy, E. 2022. "Numerical Investigation of Climate Change Effects on Storm Surges and Extreme Waves on Canada's Pacific Coast". *Atmosphere*, 13: 311-337, DOI: [10.3390/atmos13020311](https://doi.org/10.3390/atmos13020311).
- Devis, A.; Montoya, R. A.; Bernal, G. & Osorio, A. F. 2017. "Assessment of extreme wind and waves in the Colombian Caribbean Sea for offshore applications". *Applied Ocean Research*, 69: 10-26, DOI: [10.1016/j.apor.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.012).
- 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, DOI: [10.1175/JCLI-D-13-00664.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00664.1).
- Fan, Y.; Lin, S., J.; Griffies, S., M. & Hemer, Mark. A. 2014. "Simulated Global Swell and Wind-Sea Climate and Their Responses to Anthropogenic Climate Change at the End of the Twenty-First Century". *Journal of Climate*, 27(10): 3516-3536, DOI: [10.1175/JCLI-D-13-00198.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00198.1).
- GEBCO 2014. *GEBCO Digital Atlas*. [Windows], Liverpool, United Kingdom: Natural Environmental Research Council, Available: <https://www.gebco.net>.
- González, C.; Martínez, M.; Hernández, M.; Pérez, R.; Velázquez, B.; Valderá, N.; González, I.; Cutié, V.; Vázquez, R.; Cruz, E.; Mitrani, I.; Hidalgo, A.; Cabrales, J.; Lapinel, B.; Marzo, O. & Ríos, Y. 2023. "Estado del Clima en Cuba 2022. Resumen ampliado". *Revista Cubana de Meteorología*, 29(1): 1-16.
- Goodwin, P.; Haigh, I. D.; Rohling, E. J. & Slangen, A. 2017. "A new approach to projecting 21st century sea-level changes and extremes". *Earth's Future*, 5(2): 240-253, DOI: [10.1002/2016EF000508](https://doi.org/10.1002/2016EF000508).
- 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, DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00184.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00184.1).
- Hemer, Mark. A.; Fan, Y.; Mori, N.; Semedo, A. & Wang, X. L. 2013. "Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble". *Nature Climate Change*, 3(5): 471-476, DOI: [10.1038/nclimate1791](https://doi.org/10.1038/nclimate1791).
- Hidalgo, A.; Hernández, N. & Perigó, E. 2019. "Períodos de retorno para las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento y oleaje en la costa nororiental de Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2): 191-202.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Pérez, G. 2017. "Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2): 209-216.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I.; Pérez, G.; Hernández, N.; Córdova, O., L.; Regueira, V.; Ramírez, W.; González, C. M.; Machado, A.; Perigó, E.; Lorenzo, L.; Agüero, K.; Vinajera, V.; Jiménez, J.; Boligán, M.; Sánchez, L.; Victorero, A.; Mursulí, A.; García, L.; Ortega, F. E.; Castellanos, M. J.; Araujo, L. A.; Báez, E.; Laborde, N. & Casals, R. 2016. *Cronología de las inundaciones costeras por penetración del mar para el archipiélago cubano*. Resultado Científico, Holguín: CMP Holguín, Instituto de Meteorología, 40 p.
- Instituto de Geografía Tropical 2019. *Atlas Nacional de Cuba LX Aniversario*. [Multimedia, Windows], La Habana: Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- IPCC 2008. *Cambio climático 2007: Bases de la Ciencias Físicas*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 153 p., ISBN: 92-9169-121-6.
- Jevrejeva, S.; Moore, J. C. & Grinsted, A. 2012. "Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios". *Global and Planetary Change*, 80-81: 14-20, DOI: [10.1016/j.gloplacha.2011.09.006](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.09.006).
- 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*, DOI: [10.1007/s00382-023-06882-9](https://doi.org/10.1007/s00382-023-06882-9).
- Lakku, N., K. & Behera, M. R. 2022. "Skill and Intercomparison of Global Climate Models in Simulating Wind Speed, and Future Changes in Wind Speed over South Asian Domain". *Atmosphere*, 13: 864-894, DOI: [10.3390/atmos13060864](https://doi.org/10.3390/atmos13060864).
- 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, DOI: [10.1016/j.gloplacha.2019.103109](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103109).
- Martínez, A.; Tsimplis, M. N.; Marcos, M.; Feng, X.; Gomis, D.; Jordà, G. & Josey, S. A. 2016. "Response of the North Atlantic wave climate to atmospheric modes of variability". *International Journal of Climatology*, 36(3): 1210-1225, DOI: [10.1002/joc.4415](https://doi.org/10.1002/joc.4415).

- Mitrani, I.; García, E.; Hidalgo, A.; Hernández, I.; Salas, I.; Pérez, R.; Díaz, O. O.; Vichot, A.; Pérez, A.; Cangas, R.; Álvarez, L.; Pérez, O., E.; Rodríguez, J. A.; Rodríguez, C. M.; Pérez, Ada. L.; Morales, A.; Viamontes, J. & Pérez, J. 2017. *Inundaciones costeras en Cuba y sus tendencias climáticas*. La Habana: CITMATEL, 192 p., ISBN: 978-959-237-730-1.
- Mitrani, I.; Pérez, A.; Borrajero, I.; Vichot, A.; Alonso, Y.; González, Y.; Martínez, D. & Calzadilla, A. 2013. *Aplicación de los modelos WRF y WW3 para el pronóstico del tiempo y del oleaje en el Archipiélago Cubano*. Resultado Científico, La Habana: Instituto de Meteorología, 53 p.
- Mitrani, I.; Pérez, A.; Cabrales, J.; Povea, Y.; Hernández, M. & Díaz, O. O. 2019. "Coastal flood forecast in Cuba, due to hurricanes, using a combination of numerical models". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2): 121-138.
- Mitrani, I.; Vega, R.; Pérez, R. & Salas, I. 1999. "Determinación de las características extremas del viento, el oleaje y la sobre elevación del nivel del mar en las costas de Cuba.". *Revista Cubana de Meteorología*, 6(1): 38-42.
- Montoya, R.; Menéndez, M. & Osorio, A. 2018. "Exploring changes in Caribbean hurricane induced wave heights". *Ocean Engineering*, 163: 126-135, ISSN: 1873-5258, DOI: [10.1016/j.oceaneng.2018.05.032](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.032).
- Mori, N.; Yasuda, T.; Mase, H.; Tom, T. & Oku, Y. 2010. "Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming". *Hydrological Research Letters*, 4: 15-19, DOI: [10.3178/HRL.4.15](https://doi.org/10.3178/HRL.4.15).
- 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, DOI: [10.1088/1748-9326/ac1013](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1013).
- ONU 2015. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York: Asamblea General de las Naciones Unidas, 40 p.
- Pérez, P. J.; Casals, R. & Sánchez, A. 2001. "Características sinópticas y estado de la mar en las costas de la Península de Guanahacabibes.". *Revista Cubana de Meteorología*, 8(1): 96-101.
- Pérez, R. 2011. *Meteorología Tropical*. La Habana: Instituto de Meteorología.
- 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.
- R Core Team 2022. *R: A language and environment for statistical computing*. Version 4.2.2 'Innocent and Trusting', [Linux], R, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, Available: [<https://www.R-project.org/>](https://www.R-project.org/).
- Salas, I. & Mitrani, I. 1992. "Elementos de ola de viento en un ciclón tropical.". *Revista Cubana de Meteorología*, 5(2): 40-44.
- Salas, I.; Moreno, A.; Mitrani, I. & Lezcano, J. C. 1992. "Oleaje máximo y régimen hidroclimático de la costa sur de la región oriental.". *Revista Cubana de Meteorología*, 5(1): 12-16.
- Sardana, D.; Kumar, P.; Bhaskaran, P. K. & Balakrishnan, T. M. 2022. "The projected changes in extreme wave height indices over the Indian Ocean using COWCLIP2.0 datasets". *Climate Dynamics*, 59, DOI: [10.1007/s00382-022-06579-5](https://doi.org/10.1007/s00382-022-06579-5).
- Schulzweida, U. 2020. *Climate Data Operator*. Version 1.9.9, [Linux], Hamburg, Germany: Max Planck Institute of Meteorology.
- Sealy, K. S. & Strobl, E. 2017. "A hurricane loss risk assessment of coastal properties in the Caribbean: Evidence from the Bahamas". *Ocean & Coastal Management*, 149: 42-51, DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2017.09.013](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.013).
- USACE 1984. *Shore Protection Manual*. Fourth Edition ed., vol. I, Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 540 p.
- USACE 2006. *Coastal Engineering Manual*. (no. ser. Engineer Manual 1110-2-1100), vol. II, Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1720 p.
- Vega, M. J.; Álvarez, O.; Restrepo, J. C.; Ortiz, J. C. & Otero, L. J. 2020. "Interannual variability of wave climate in the Caribbean Sea". *Ocean Dynamics*, DOI: [10.1007/s10236-020-01377-1](https://doi.org/10.1007/s10236-020-01377-1).
- Wang, X. L.; Feng, Y. & Swail, V. R. 2012. "North Atlantic wave height trends as reconstructed from the 20th century reanalysis". *Geophysical Research Letters*, 39(18): L18705-L18711, DOI: [10.1029/2012GL053381](https://doi.org/10.1029/2012GL053381).
- 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, DOI: [10.1002/2013GL058650](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.