

Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe

Reconstrucción histórica y proyecciones del efecto del cambio climático sobre el oleaje en la costa de Cuba



Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/suscripciones

Este documento fue preparado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria), bajo la dirección de Íñigo J. Losada Rodríguez. Los trabajos del proyecto fueron realizados por los investigadores Adrián Acevedo, Paula Camus, Pedro Díaz-Simal, Antonio Espejo, Melisa Menéndez, Pelayo Menéndez, Marta Ramírez, Alexandra Toimil, Saúl Torres, María Emilia Maza y María Fuentes, todos ellos del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

El estudio se llevó a cabo dentro de las actividades de colaboración entre la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Gobierno de Cuba “Evaluación de impactos y vulnerabilidad en la zona costera norte occidental de Cuba ante huracanes y el cambio climático”, en el marco del proyecto de la CEPAL y el Gobierno de España “Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”. Por parte de la CEPAL, el equipo que coordinó y supervisó el estudio estuvo integrado por Carlos de Miguel, Jefe de la Unidad de Políticas Públicas para el Desarrollo Sostenible; José Javier Gómez, Oficial de Asuntos Ambientales, y Karina Martínez y Mauricio Pereira, Investigadores, todos ellos de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos.

Se agradece especialmente el apoyo del personal de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio para la Transición Ecológica de España, en particular de Ana Pintó y Eduardo González, así como el de Victoria Osuna Recio, Responsable de Proyectos de Desarrollo Rural de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) en Cuba.

Además, para la ejecución de este proyecto se contó con la colaboración de un equipo de funcionarios de la Agencia de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, integrado por Maritza García, Presidenta; Jesús Guerra Bell, Especialista Principal de la Dirección de Relaciones Internacionales; Rudy Montero Mata, Jefe del Grupo de Evaluación de Riesgos; Sergio Lorenzo Sánchez, Coordinador Científico del Macroproyecto; Isabel Torna Falco, Especialista del Grupo de Evaluación de Riesgos, y Jorge Olivera Acosta y Ramón Pérez Díaz, Especialistas del Macroproyecto.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2018/69
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2018
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.18-00597

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Prefacio	7
Resumen ejecutivo	9
Introducción	11
I. Objetivos	13
II. Metodología.....	15
III. Modelo y configuración regional.....	17
A. Bases de datos	17
1. Batimetrías	17
2. Bases de datos de viento.....	19
3. Bases de oleaje <i>offshore</i>	19
4. Datos de marea astronómica	21
5. Datos instrumentales satelitales	22
B. Corrección y generación de los forzamientos del oleaje.....	23
C. Propagación del oleaje.....	26
IV. Validación	29
V. Caracterización climática del oleaje	33
VI. Proyecciones de oleaje de cambio climático.....	45
A. Metodología	46
1. Datos históricos y proyecciones de cambios climáticos	46
2. Modelo de <i>downscaling</i> estadístico	47
3. Definición del predictor	49
Bibliografía.....	55
Anexo	57

Cuadros

Cuadro 1	Modelos de circulación general de la fase 5 del proyecto de intercomparación Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) utilizados en las proyecciones del oleaje	47
----------	--	----

Gráficos

Gráfico 1	Batimetría de detalle a lo largo del litoral de Cuba	18
Gráfico 2	Distribución de corales a lo largo del litoral de Cuba	18
Gráfico 3	Campos de vientos en superficie a partir del reanálisis global CFSR en la zona del Caribe	19
Gráfico 4	Índice de dispersión y sesgo obtenidos al comparar los datos de satélite (1992-2013) con los datos del reanálisis GOW- CFSR a escala global	20
Gráfico 5	Posición de los puntos GOW seleccionados para forzar el modelo de propagación	21
Gráfico 6	Series temporales de nivel de marea astronómica extraída a partir de los armónicos de TPXO 8 en un punto frente a Cayo Coco y en el Golfo de Batabanó	22
Gráfico 7	Número de observaciones satelitales a lo largo de la costa de Cuba	23
Gráfico 8	Distribuciones empíricas de la altura de ola significativa a lo largo de la costa de Cuba	25
Gráfico 9	Calibración del nodo GOW 2.0 [-76,25°; 19,25°] (punto 5 del gráfico 8)	26
Gráfico 10	Malla usada en Cuba y detalles de la bahía de La Habana y la bahía de Cárdenas	28
Gráfico 11	Coefficiente de correlación de Pearson de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba	31
Gráfico 12	Sesgo (<i>bias</i>) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba	31
Gráfico 13	Índice de dispersión (<i>scatter index</i> (SI)) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba	31
Gráfico 14	Pendiente (<i>slope</i>) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba	32
Gráfico 15	Indicador <i>Brier Score Index</i> de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba frente a los datos de GOW2	32
Gráfico 16	Dispersión de todos los pares de datos de la altura de ola de la base de datos históricos generada a lo largo del litoral de Cuba frente a los datos observados	32
Gráfico 17	Media anual de la altura de ola significativa	33
Gráfico 18	Media estacional de la altura de ola significativa	34
Gráfico 19	Percentil 99% por estaciones de la altura de ola significativa	35
Gráfico 20	Direccionalidad del oleaje a lo largo de la costa de Cuba	36
Gráfico 21	Estacionalidad de la altura del oleaje a lo largo de la costa de Cuba	37
Gráfico 22	Media anual del período medio del oleaje	38
Gráfico 23	Media anual del período de pico del oleaje	38
Gráfico 24	Espectro medio a lo largo de la costa de Cuba	40
Gráfico 25	Ejemplo de ficha del régimen medio de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba	41
Gráfico 26	Ejemplo de ficha del régimen extremal (POT-GEV) de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba	42
Gráfico 27	Ejemplo de ficha del régimen extremal (POT-Gumbel) para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba	43
Gráfico 28	Esquema de la metodología de regionalización (downscaling) estadística para la proyección del oleaje	48
Gráfico 29	Subdominios del oleaje a escala global sobre la base de los 11 patrones del área de generación del oleaje	50

Gráfico 30	Altura de ola significativa (Hs) media a escala global y cambios proyectados en la media anual y la media de invierno y verano entre 1979-2005 y 2070-2099.....	51
Gráfico 31	Cambio de altura de ola significativa (Hs) media en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099.....	51
Gráfico 32	Cambios estacionales en invierno y verano de la altura de ola significativa (Hs) media en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099.....	52
Gráfico 33	Cambios proyectados a escala global del valor anual y estacional del período de pico (Tp) del oleaje entre 1979-2005 y 2070-2099.....	53
Gráfico 34	Cambio del período de pico (Tp) medio del oleaje en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099.....	53
Gráfico 35	Cambios estacionales en invierno y verano del período de pico (Tp) medio del oleaje en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099.....	54

Diagramas

Diagrama 1	Esquema general de la metodología empleada para la obtención del oleaje a lo largo de la costa de Cuba.....	15
------------	---	----

Prefacio

Desde 2008 la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), el Gobierno de España y la Universidad de Cantabria han venido colaborando en una línea de investigación denominada “Estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”, cuyo objetivo fundamental ha sido el establecimiento de un marco de cooperación, para proporcionar la mejor información científico-técnica disponible en la región que permita afrontar la lucha contra el cambio climático en las zonas costeras de América Latina y el Caribe y para apoyar a la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC).

Durante la primera fase de esta colaboración se desarrolló una metodología específica para la evaluación de impactos del cambio climático en las áreas costeras. Los resultados de esta fase se publicaron en seis documentos sobre el análisis de las dinámicas y las tendencias, la vulnerabilidad de las costas, los impactos derivados, los riesgos asociados, así como los efectos teóricos del cambio climático y la descripción metodológica. Además, se elaboró un visor web que permite georreferenciar las dinámicas y los impactos con una resolución espacial de cinco kilómetros en toda la franja costera de la región. Las metodologías y resultados obtenidos de esta línea de investigación sirven de base para la realización de nuevos estudios sectoriales y subnacionales que permiten hacer análisis de alta resolución sobre impactos y adaptación en las zonas costeras de América Latina y el Caribe.

El Caribe es una zona de gran vulnerabilidad ante los efectos derivados del cambio climático, por lo que esta realidad llevó a los Gobiernos de Cuba y España, la CEPAL y la Universidad de Cantabria a emprender un trabajo de colaboración para profundizar los resultados obtenidos en la primera etapa, en esta oportunidad en el marco del proyecto “Evaluación de impactos y vulnerabilidad en la zona costera norte occidental de Cuba ante huracanes y el cambio climático”.

La costa de Cuba es de extraordinaria importancia para el país, ya que, como se indica en su Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, debido a la presencia de núcleos poblacionales de gran densidad y con tasas de crecimiento muy altas, y la intensa actividad turística, industrial y marítimo-portuaria, se registra gran competencia entre la gestión económica y el funcionamiento de los ecosistemas. Por lo tanto, existe un inminente riesgo ante cualquier afectación a la costa del archipiélago cubano como consecuencia del ascenso del nivel medio del mar y de las inundaciones provocadas por eventos hidrometeorológicos extremos.

El proyecto de evaluación de impactos permitió la realización de un programa de transferencia tecnológica y de capacitación al personal técnico de la Agencia de Medio Ambiente de Cuba en los campos de la evaluación económica de proyectos ambientales y en el análisis económico aplicado al medio ambiente, así como la generación de datos para la caracterización del oleaje de la costa de Cuba. La capacitación se implementó mediante un conjunto de cursos impartidos por el personal del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC) y la CEPAL en La Habana y en Cantabria. Estas actividades se desarrollaron durante 2017 y el primer semestre de 2018. Los principales resultados de este proyecto comprenden los documentos: “Reconstrucción histórica y proyecciones del efecto del cambio climático sobre el oleaje en la costa de Cuba”, “Evaluación de los sistemas de protección de los corales y manglares de Cuba” y “Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión por efecto del cambio climático”.

Resumen ejecutivo

El objetivo general de este documento es presentar un resumen de la generación de una base de datos históricos del oleaje a lo largo de la costa cubana (Regional Ocean Waves (ROW) Cuba) con el propósito de proveer una caracterización climática robusta del oleaje para su aplicación en diferentes estudios de ingeniería costera.

La base de datos ROW Cuba proporciona diferentes parámetros horarios del estado del mar (por ejemplo, la altura de ola significativa, el período medio y de pico o la dirección media del oleaje) a una resolución espacial del orden de 1,0 km en costa desde 1979 a 2017. Estos datos fueron generados con el modelo de propagación del oleaje SWAN forzado con los vientos de la base de reanálisis atmosférico CFSR a una resolución de 0,3° y condiciones de contorno provenientes de la base de datos de oleaje a escala global GOW2 a una resolución de 0,25°, previamente calibrada con datos de satélite.

Además, se elaboró un atlas de caracterización climática aplicando diversas metodologías de análisis estadístico desarrolladas por IHCantabria. Los resultados de este análisis se han plasmado en una serie de fichas (régimen medio y extremal) en un conjunto de localizaciones que cubren la costa de Cuba a diferentes profundidades.

Se incluyen los resultados de las proyecciones de cambio climático del oleaje para final de siglo a una resolución de 1,0° con el fin de disponer del orden de la magnitud de estos cambios para su consideración en la evaluación del riesgo asociado a los impactos costeros.

Introducción

La información histórica procedente de observaciones directas o instrumentales suele ser la fuente de información océano-meteorológica más fiable. Pese a que la cantidad de datos instrumentales recolectados por boyas y satélites ha crecido exponencialmente en las últimas tres décadas, en general esta información es escasa, con registros relativamente cortos y en posiciones que no están repartidas de manera heterogénea. Por otro lado, el modelado numérico del oleaje permite generar bases de datos históricas suficientemente largas (del orden de décadas) y espacialmente homogéneas denominadas *hindcast* o retroanálisis. Estas reconstrucciones complementan las bases de datos instrumentales disponibles, ofreciendo información detallada del oleaje a pesar de no disponer de medidas instrumentales cercanas. Los *hindcast* de oleaje regionales, convenientemente validados, sirven para abordar de manera adecuada tanto proyectos de ingeniería de costas como análisis de vulnerabilidad y riesgo asociado al oleaje.

Las bases de datos históricos de oleaje a escala global se elaboran con modelos numéricos que resuelven específicamente los procesos de generación y propagación del oleaje en aguas abiertas y no las modificaciones que sufre el oleaje al propagarse por aguas someras. El oleaje que incide en un punto de la costa puede haberse generado a miles de kilómetros de distancia, lo que hace que los dominios computacionales de estos modelos suelen abordar la escala global o de cuenca oceánica. Este requisito obliga a utilizar resoluciones relativamente amplias (por ejemplo 100 km) con las que reproducir satisfactoriamente los procesos de interés con una velocidad de computación asumible. Así, si el objetivo es disponer de información de oleaje en las inmediaciones de la costa, es necesario transferir correctamente estas bases de datos desde aguas abiertas hasta la zona de estudio. Para ello, se emplean modelos numéricos que resuelven específicamente los procesos de propagación y generación del oleaje en aguas someras (refracción, generación local por viento, disipación con el fondo y rotura, entre otros), permitiendo aumentar la resolución espacial (*downscaling*) de los modelos globales disponibles.

I. Objetivos

El objetivo de este documento es describir la base de datos históricos de oleaje a lo largo de la costa de Cuba (Regional Ocean Waves (ROW) Cuba), desarrollada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC). Esta base fue generada para disponer de datos horarios de oleaje homogéneos espacial y temporalmente durante un período superior a 30 años. Contar con información de estas características permite una caracterización robusta del clima marítimo a lo largo del litoral de Cuba para diferentes aplicaciones de ingeniería costera.

La base de datos de oleaje generada tiene como principales características homogeneidad espacial y temporal y longitud temporal, de tal manera que se proporcionan distintos parámetros de oleaje a una escala temporal horaria desde 1979 a 2017 a una resolución espacial de 1,0 km a lo largo de todo el litoral.

La descripción de esta base abarca tanto los aspectos técnicos de su generación como la caracterización climática del oleaje a partir de estos datos. En primer lugar, se expone la metodología aplicada para la obtención de una base de datos históricos del oleaje en la costa de Cuba. Se describen las bases de datos utilizadas como forzamientos para la generación del oleaje a escala regional, la corrección espectral del oleaje en aguas profundas, el modelo de propagación utilizado para la simulación numérica del oleaje y la validación de los datos obtenidos. Posteriormente, se presentan algunos ejemplos de las fichas que integran el atlas climático del oleaje en la costa de Cuba compuesto por mapas espaciales de diferentes parámetros del oleaje a escala anual y estacional y fichas de caracterización del régimen medio y extremal en diferentes localizaciones a lo largo de la costa. Por último, se muestran los resultados de las proyecciones del oleaje en distintos escenarios de cambio climático.

La disponibilidad de bases de datos históricos de oleaje homogéneas en el espacio y tiempo permite una caracterización de la variabilidad climática del oleaje: análisis de la estacionalidad, interanualidad, correlación con patrones atmosféricos e índices climáticos.

Por otro lado, estos datos históricos de oleaje son imprescindibles para la caracterización de los riesgos costeros de inundación y erosión, de los cuales el oleaje constituye una de las dinámicas determinantes. En el caso de la inundación, la rotura del oleaje genera un aumento del nivel del mar (*run-up*), que puede llegar a ser de gran magnitud en el caso de eventos extremos y producir daños al sistema socioeconómico y natural. Además, el oleaje es la dinámica más importante en la estabilidad y evolución de una playa. La rotura del oleaje pone en suspensión gran cantidad de sedimento que, de este modo, es susceptible de ser transportado por las corrientes existentes. Las principales corrientes de la zona de rompiente son las generadas por la propia rotura del oleaje tanto en sentido transversal (corrientes de

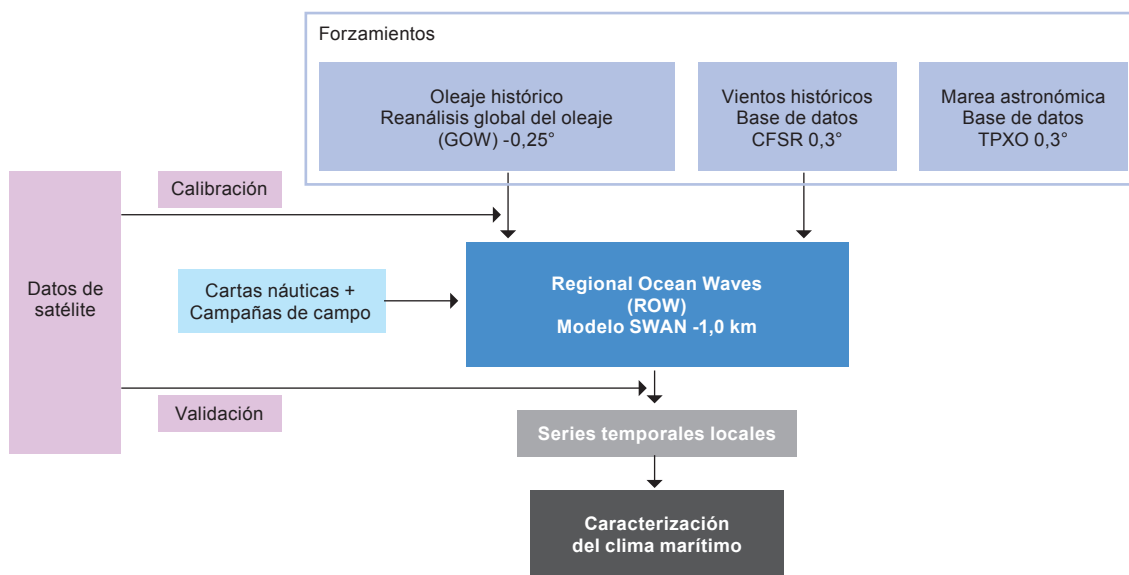
resaca y de retorno) como en sentido longitudinal, produciendo variaciones del fondo. Los temporales pueden provocar grandes modificaciones del perfil y planta de una playa. Asimismo, en los estudios de riesgos costeros de erosión e inundación, esta información es imprescindible en cualquier proyecto de ingeniería costera. Por ejemplo, el diseño de estructuras costeras requiere series históricas de altura de ola significativa a pie de dique para establecer la altura de ola de diseño cumpliendo determinados criterios de seguridad y fiabilidad. El diseño de un puerto también está condicionado por las características del oleaje local, y es preciso verificar determinados umbrales de operatividad respecto a las condiciones de navegación o rebase de las estructuras de protección. La regeneración de una playa conlleva un análisis previo de las condiciones históricas del oleaje que han producido procesos de erosión. Además, la configuración en planta y el perfil de equilibrio de la playa dependen de la energía media del oleaje local.

La disponibilidad de proyecciones de cambio climático del oleaje para final de siglo permitirá analizar la magnitud de estos cambios y evaluar la necesidad de incorporar esta variación debida al cambio climático en la vida útil de las infraestructuras marítimas o la evolución de la costa en el muy largo plazo.

II. Metodología

En el diagrama se presenta el esquema general de la metodología empleada. La reconstrucción histórica del oleaje en la costa que ofrece ROW Cuba requiere datos históricos de oleaje y viento (forzamientos). El oleaje en los contornos se calibra previamente mediante datos de satélite. La propagación del oleaje hasta la costa se realiza mediante el modelo de propagación del oleaje SWAN (*Simulating Waves Nearshore* (Booij, Ris y Holthuijsen, 1999)), utilizando una batimetría obtenida mediante la digitalización de cartas náuticas y la asimilación de campañas de campo y fuentes de datos de batimetría global para definir el fondo marino con una resolución adecuada para reproducir procesos más importantes que gobiernan la transformación del oleaje. Por último, los datos de satélite también se emplean para la validación espacial del oleaje a lo largo del dominio de cálculo.

Diagrama 1
Esquema general de la metodología empleada para la obtención del oleaje a lo largo de la costa de Cuba



Fuente: Elaboración propia.

III. Modelo y configuración regional

La base de datos de oleaje en aguas superficiales fue obtenida mediante el modelo numérico de propagación del oleaje SWAN, que requiere una batimetría de alta resolución a lo largo de toda la costa de Cuba, datos históricos de viento, oleaje y niveles (marea astronómica) como forzamientos del modelo, así como una definición de la rugosidad del fondo. El viento proviene de la base de datos históricos CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis* (Saha y otros, 2010)). Para la caracterización del oleaje en aguas abiertas se utiliza la base de datos históricos *Global Ocean Waves* v2 (GOWII) (Pérez, Menéndez y Losada, 2017), generada por IHCantabria. Estas condiciones de oleaje se calibran con datos instrumentales satelitales para asegurar la calidad de los forzamientos del modelo. Debido a la ausencia de registros de boyas, los campos de oleaje de alta resolución que se generan se validan espacialmente con datos de altimetría. En este documento se describe lo siguiente: i) las bases de datos utilizadas en la generación de la base de datos históricos del oleaje, ii) la metodología aplicada en la calibración de los datos de oleaje en aguas profundas y iii) el modelo numérico utilizado para propagar el oleaje y la malla de computación planteada.

A. Bases de datos

Las bases de datos que se describen a continuación son datos batimétricos y de tipologías del fondo, datos de reanálisis de viento y oleaje, datos de marea astronómica e instrumentales del oleaje.

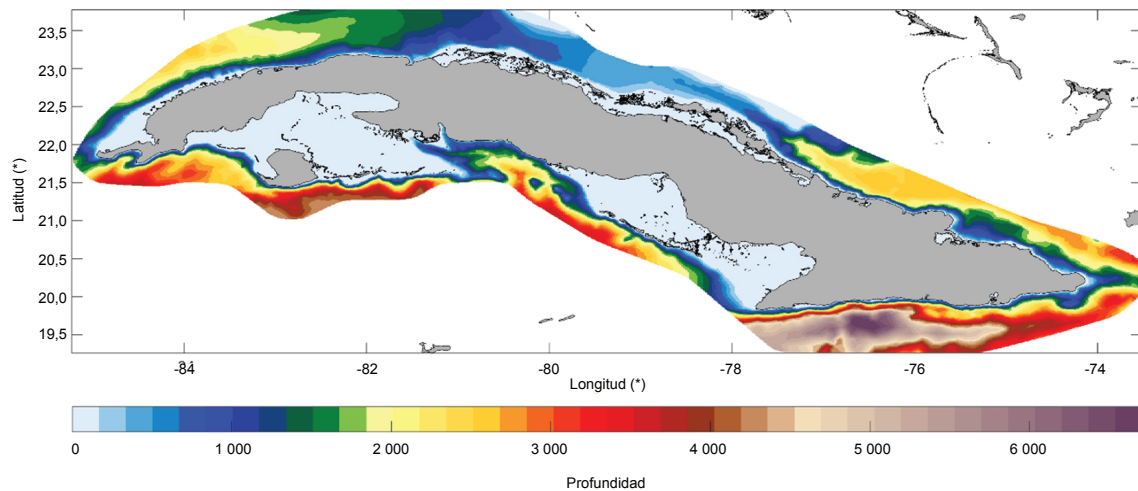
1. Batimetrías

La información sobre el fondo marino es clave en cualquier estudio de propagación de oleaje. En su viaje hacia la costa, el oleaje está condicionado por los forzamientos a los que se ve sometido y por las irregularidades del fondo marino. En profundidades indefinidas son importantes las irregularidades a gran escala, como cañones submarinos o grandes cabos. Sin embargo, cuando el oleaje llega a profundidades intermedias y reducidas, su comportamiento es un reflejo de la batimetría.

En este estudio se utilizaron dos bases de datos de batimetría. Por un lado, la batimetría global General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (véase [en línea] <http://www.gebco.net/>) y, por otro, cartas náuticas y batimetrías sonar de alta resolución generadas por Navionics SonarCharts (véase [en línea] <https://www.navionics.com>), que complementan y mejoran la resolución en las proximidades de la costa.

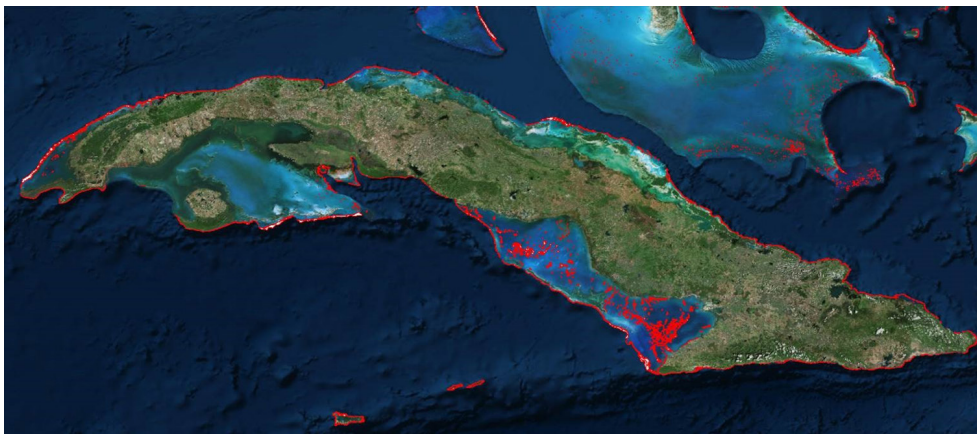
GEBCO es una batimetría global de 30 minutos de resolución generada por la combinación de datos altimétricos de sondas de barcos y satélites. Estos datos son sometidos a un control de calidad. Después de analizar esta batimetría, se detectaron imprecisiones en zonas cercanas a la costa, en algunos casos, del orden de las decenas de metros. Estas imprecisiones se deben a la fuente de la información, ya que los sensores de satélites tienen problemas en las zonas cercanas a la costa, por lo que no hay resolución suficiente para definir adecuadamente el relieve marino, los bajos, las islas y las penínsulas, entre otros. Con el objetivo de mejorar la resolución de la batimetría en la zona de estudio, se incluyeron batimetrías sonar de alta resolución disponibles. En el gráfico 1 se muestra la batimetría a lo largo del litoral de Cuba resultado de la unión entre GEBCO y las campañas batimétricas disponibles.

Gráfico 1
Batimetría de detalle a lo largo del litoral de Cuba
(En metros)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2
Distribución de corales a lo largo del litoral de Cuba



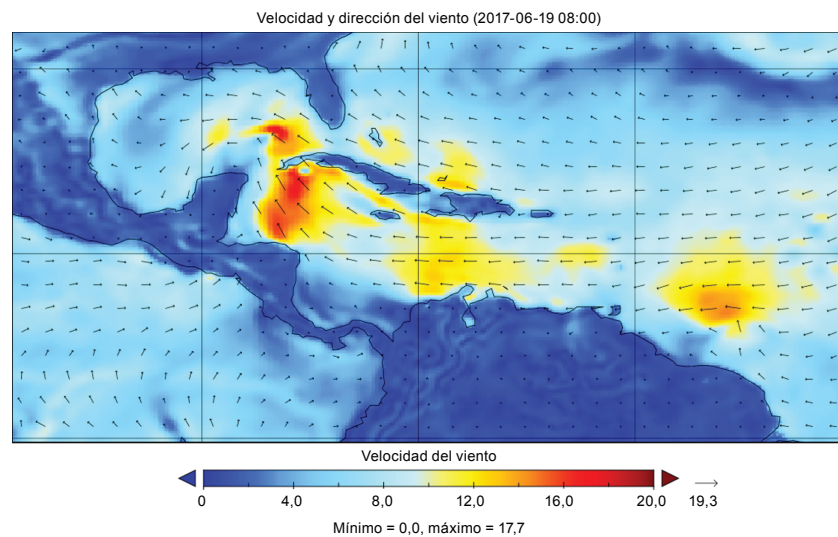
Fuente: Elaboración propia. Bases de datos de viento.

Con el fin de obtener una mejor definición de la rugosidad del fondo, el coeficiente de fricción por fondo fue definido como espacialmente variable con base en la distribución de los corales existentes en la costa cubana. Su distribución se obtuvo de la base de datos WCMC-008, generada por el Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en colaboración con el Instituto de Recursos Mundiales y The Nature Conservancy. Las fuentes de datos incluyen el Proyecto de Mapeo de Arrecifes Coralinos del Milenio (IMaRS-USF, 2005) y el Atlas Mundial de los Arrecifes de Coral (Spalding, Ravilious y Green, 2001). En el gráfico 2 se muestra la distribución de los corales a lo largo del litoral de Cuba.

2. Bases de datos de viento

El reanálisis atmosférico global CFSR (Saha y otros, 2010) es un producto de tercera generación ejecutado con el modelo acoplado atmósfera-océano Climate Forecast System (CFS), que representa la interacción global entre los océanos, la tierra y la atmósfera. Proporciona las mejores estimaciones del estado de la atmósfera y el océano en el período 1979-2010, con una resolución espacial de 0,3 grados (en torno a 33 km) y a partir de 2011 a una resolución de 0,25 grados, en ambos casos con datos horarios. En el gráfico 3 se muestra un campo de vientos en la zona del Caribe (2017/06/19/8h). Las flechas indican la dirección del viento y la velocidad está representada en una escala amarilla-roja.

Gráfico 3
Campos de vientos en superficie a partir del reanálisis global CFSR en la zona del Caribe
(En metros/segundo)



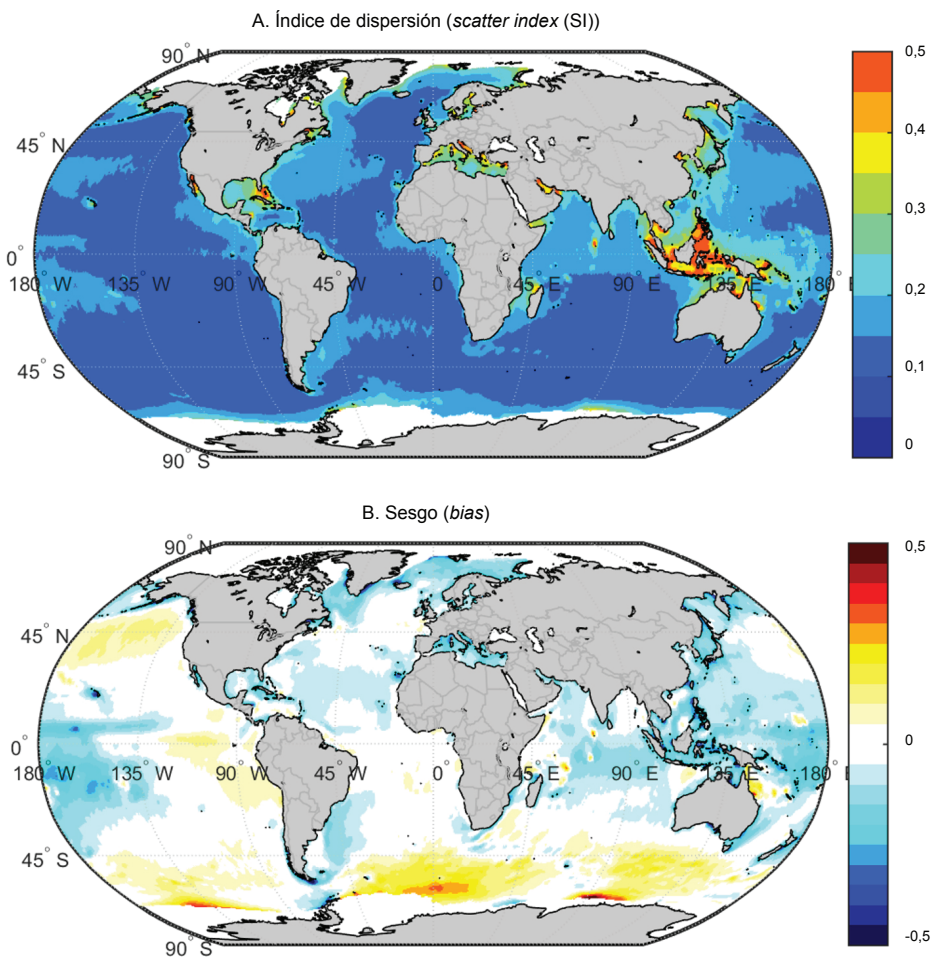
Fuente: Elaboración propia.

3. Bases de oleaje offshore

Las series temporales de oleaje que son utilizadas para forzar el modelo de propagación provienen del reanálisis global Ocean Waves 2.0 (GOW 2.0) (Pérez, Menéndez y Losada, 2017). Este reanálisis ha sido obtenido con el modelo WaveWatchIII (versión 4.18) (Tolman, 2014). El modelo ha sido ejecutado con una configuración multimalla con anidamientos en ambos sentidos, compuesto por una malla global de aguas profundas de 0,5° de resolución, dos mallas de detalle que cubren las zonas polares de 0,25° y una malla que cubre todas las plataformas continentales con una resolución de 0,25°. Tanto los vientos como la cobertura de hielo provienen del reanálisis atmosférico CFSR. La batimetría proviene del modelo batimétrico global ETOPO 1 (Amante y Eakins, 2009), mientras que la máscara tierra-mar y la línea de costa provienen de Wessel y Smith (1996).

Los parámetros de estado de mar disponibles son: altura de ola significativa (H_s), dirección media (dir), período medio (t_{02}), dispersión direccional (spr) y frecuencia de pico (fp). Adicionalmente, y con el objetivo de anidar modelos de oleaje de alta resolución en la costa, se han almacenado los espectros direccionales 3-horarios en todos los puntos de la malla de plataforma. El espectro de oleaje ha sido definido en 32 frecuencias que varían no linealmente entre 0,0372 Hz y 0,714 Hz y 25 direcciones. El modelo almacena las alturas, períodos, direcciones y dispersión direccional de las diferentes particiones del espectro (Gerling, 1992; Hanson y Philips, 2001). La parametrización utilizada ha sido la TEST451 (Ardhuin y otros, 2010), ya que ha sido validada con datos de boyas y satélites, demostrando obtener un menor sesgo que versiones anteriores. En el gráfico 4 se muestra la distribución espacial de los cuantificadores de calidad: índice de dispersión (*scatter index* (SI)) y sesgo (*bias*), determinados durante el período 1992-2013. Se observa una ligera subestimación del oleaje al sur de la isla de Cuba y una mayor dispersión de los datos al norte de la isla.

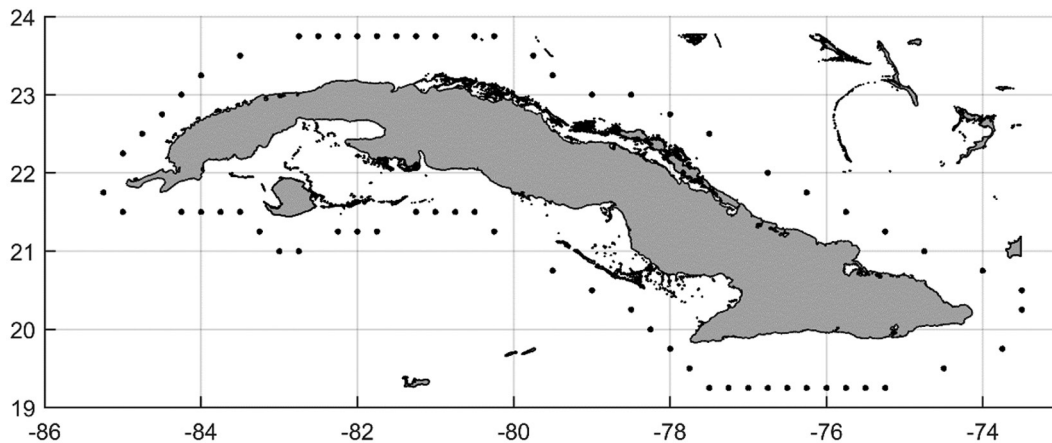
Gráfico 4
Índice de dispersión y sesgo obtenidos al comparar los datos de satélite (1992-2013) con los datos del reanálisis GOW- CFSR a escala global



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 5 se muestran los puntos GOW seleccionados para forzar el modelo de propagación, que coinciden con el contorno exterior de la malla de computación propuesta y que se describe posteriormente. Todos los puntos se encuentran en profundidades indefinidas (1000 m o más), a excepción de los puntos de la parte nororiental (frente a Cayo Coco), con profundidades inferiores a los 25 m debido a la presencia del Gran Bajo de las Bahamas. La elección de estos puntos corresponde a la disponibilidad de datos espectrales almacenados en el reanálisis GOW 2.0.

Gráfico 5
Posición de los puntos GOW seleccionados para forzar el modelo de propagación



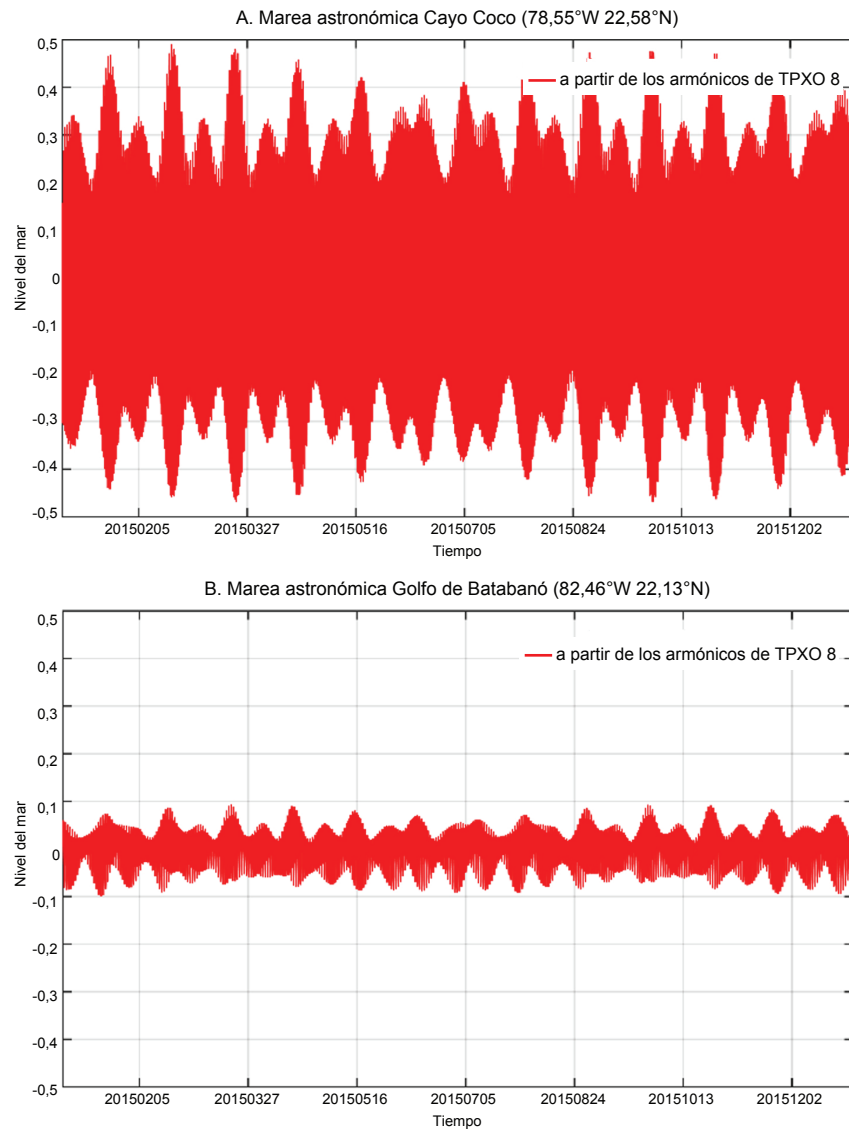
Fuente: Elaboración propia.

4. Datos de marea astronómica

La marea astronómica se calculó utilizando la base de datos procedente del modelo global de mareas TPXO, desarrollado por la Universidad de Oregon (Egbert, Bennett y Foreman, 1994; Egbert y Erofeeva, 2002). El TPXO es un modelo inverso de mareas que asimila la información del nivel del mar derivada de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. Dicho modelo representa un ajuste óptimo (en términos de mínimos cuadrados) de la ecuación de marea de Laplace a los datos de satélite resultantes de la misión TOPEX/Poseidon. Actualmente, el modelo TPXO es uno de los modelos globales de marea más precisos.

La base de datos TPXO, resultante del modelo, proporciona ocho componentes armónicos primarios (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), dos de largo período (Mf y Mm) y tres no lineales (M4, MS4, MN4). Los datos se proporcionan en una malla con cobertura global de 1440 x 721 puntos y con 0,25° de resolución espacial, tanto en latitud como en longitud. La base de datos TPXO, así como una descripción más detallada del modelo numérico, se pueden encontrar en <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>. En el gráfico 6 se muestra la serie temporal de marea astronómica del año 2015 en un punto al norte de la isla (frente a Cayo Coco) y uno en el sur, en el Golfo de Batabanó, que ilustra la alta variabilidad espacial de la magnitud de la marea astronómica. Conocidas las constantes armónicas en la zona, es posible reconstruir, con resolución horaria, tanto la serie de nivel como de corrientes para el período 1979-2010 en cualquier punto del dominio. Se puede observar que la carrera de marea a lo largo del litoral de Cuba varía entre los 0,5 m en el norte de la isla y 0,1 m en el sur.

Gráfico 6
Series temporales de nivel de marea astronómica extraída a partir de los armónicos de TPXO 8
en un punto frente a Cayo Coco y en el Golfo de Batabanó
(En metros)



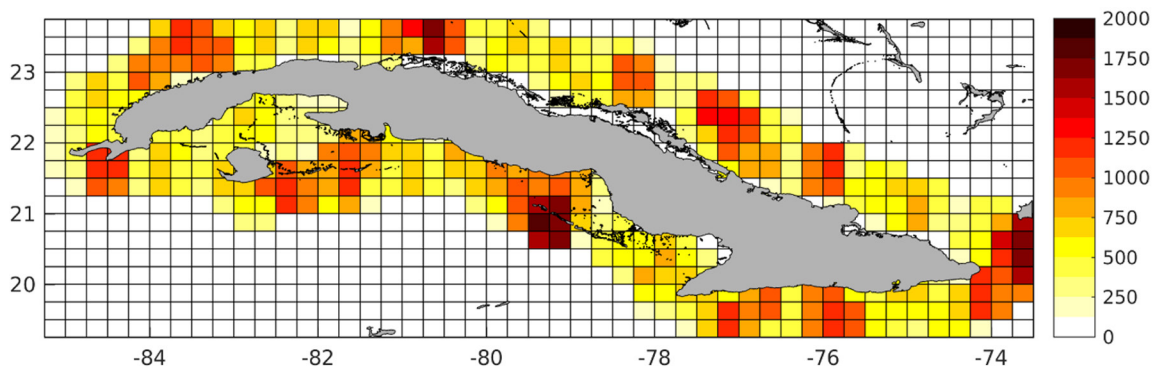
Fuente: Elaboración propia.

5. Datos instrumentales satelitales

Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero son los altímetros de radar los que más tiempo llevan usándose con fines meteorológico-oceanográficos. El altímetro es un radar que transmite pulsos hacia la superficie terrestre. El tiempo de retorno de la señal, así como su modificación frecuencial después de la reflexión del pulso en la superficie del mar, son valores que se relacionan con el nivel del mar o la rugosidad superficial. De esta manera es posible determinar con gran precisión variables oceanográficas como la altura del oleaje.

En contraposición a la multitud de ventajas y novedades que ofrece la altimetría satelital, esta presenta un gran inconveniente que restringe su utilización para caracterizar el oleaje en una posición cualquiera. Este inconveniente es la resolución tanto espacial como temporal de los datos, pues el satélite orbita alrededor de la tierra con una trayectoria fija, tardando entre 10 y 15 días en pasar dos veces por un mismo punto; por lo tanto, no se generan series continuas. Por ello, esta base de datos se ha utilizado únicamente para calibrar la base de datos de oleaje y para validar los resultados. La distribución espacial del número de observaciones satelitales a lo largo de la costa de Cuba se muestra en el gráfico 7. Estos datos proceden de varios productos seleccionados acorde con los parámetros de calidad específicos de cada misión: ERS 1 y 2, TOPEX-Poseidon, GOPSAT Follow-ON (GFO), Jason-1, Jason-2 y CryoSat. La estimación de la altura de ola significativa de cada satélite ha sido calibrada según la metodología descrita en Queffeuou, Ardhuin y Lefèvre (2011). Sin embargo, se observan mediciones espurias en las cercanías de la costa, donde la medición del satélite puede estar influenciada por la rugosidad del terreno (Thibaut y Labroune, 2007). Schiller y Brassington (2011), no recomiendan el uso de aquellas medidas a profundidades menores de 400 m debido a correcciones del nivel de marea poco precisas o al efecto de las variaciones de la presión atmosférica y el viento que se producen cerca de la costa.

Gráfico 7
Número de observaciones satelitales a lo largo de la costa de Cuba



Fuente: Elaboración propia.

B. Corrección y generación de los forzamientos del oleaje

Las bases de datos de reanálisis permiten una descripción detallada del clima marítimo a partir de series temporales continuas con una buena cobertura espacial y temporal. Sin embargo, estos datos presentan ciertas imprecisiones debido a deficiencias en la definición de los forzamientos, especialmente los vientos, y una insuficiente resolución temporal y espacial del modelo de generación del oleaje. Para asegurar la calidad de los datos a usar como forzamientos, se propone la aplicación de una calibración paramétrica direccional para corregir la altura de ola significativa a partir de datos instrumentales de satélite (Mínguez y otros, 2011).

El modelo se expresa matemáticamente como:

$$H_s^C = a^R(\theta) [H_s^R]^{b^R(\theta)}$$

donde H_s^R es la altura de ola significativa del reanálisis, H_s^C es la altura de ola significativa calibrada o corregida y $a^R(\theta)$ and $b^R(\theta)$ son los parámetros de corrección que dependen de la dirección media del oleaje θ del reanálisis.

Las variaciones en los valores que van adoptando los coeficientes a^R y b^R a lo largo de la rosa de direcciones posibles se obtienen suponiendo que se produce una variación suave mediante un *spline*, de forma que una vez evaluados los coeficientes y alturas de ola límites del tramo lineal cada 22,5 grados, los valores correspondientes asociados a cualquier otra orientación se obtienen interpolando mediante una función cúbica. De esta forma se puede expresar cada coeficiente como:

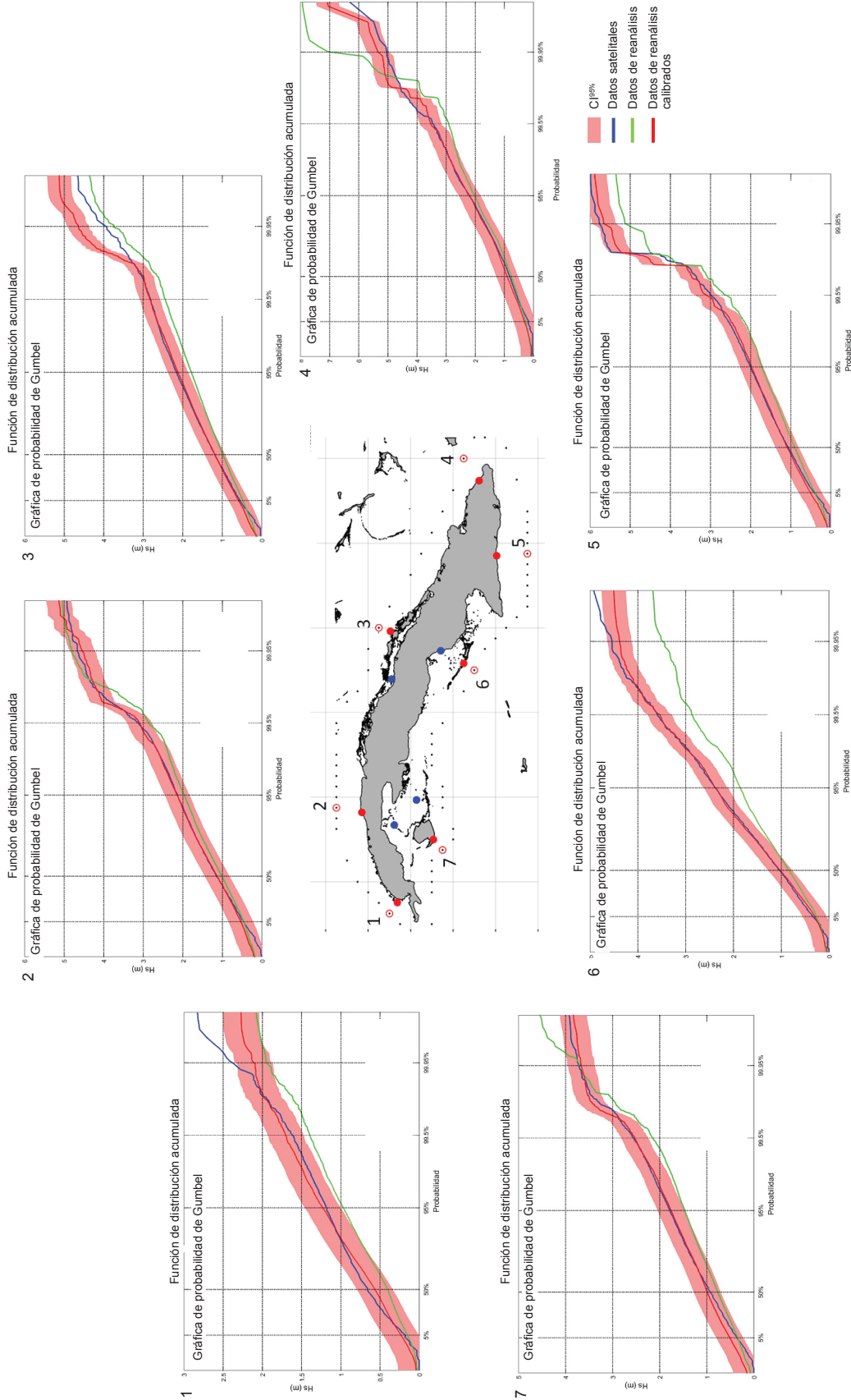
$$a_i^R(\theta_i) = a_j + x_j^a(\theta_i - \theta_j) + y_j^a(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^a(\theta_i - \theta_j)^3$$

$$b_i^R(\theta_i) = b_j + x_j^b(\theta_i - \theta_j) + y_j^b(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^b(\theta_i - \theta_j)^3$$

donde a_i^R and b_i^R son los parámetros de corrección para una dirección determinada θ_j , $a_j, b_j; j=1, \dots, n_p$ son los parámetros a estimar asociados a cada dirección $\theta_j; j=1, \dots, n_d$, y $x_j^a, y_j^a, z_j^a, x_j^b, y_j^b, z_j^b; j=1, \dots, n_d$ son los correspondientes parámetros de las funciones cúbicas, que se obtienen imponiendo condiciones de continuidad desde orden cero a dos a lo largo de la circunferencia ($0 \leq \theta \leq 2\pi$). Los parámetros del modelo de calibración $a_j, b_j; j=1, \dots, n_p$ se estiman mediante un método de mínimo cuadrados. El primer paso de la metodología de calibración es seleccionar n_d pares de datos (H_s^R, H_s^I) en un área alrededor del nodo GOW 2.0 a calibrar. En este trabajo, se han utilizado datos de satélite en un radio de 0,5° alrededor de cada nodo GOW 2.0, que define los forzamientos en el contorno de la malla de propagación del oleaje. Una vez obtenidos los pares de datos de H_s junto con las direcciones, se han agrupado por direcciones según sectores direccionales de 22,5° de amplitud y para cada subconjunto de pares de datos se ha procedido a realizar un ajuste cuantil-cuantil con base en $n_q=20$ cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel de máximos. Esta discretización se emplea para tratar de dar el mismo peso a los datos en todo el rango de variación de la altura de ola, de forma que los regímenes medio-bajo, mucho más frecuentes, no enmascaren los oleajes menos frecuentes, pero más extremos. El gráfico 8 recoge un resumen del efecto de calibración a lo largo de la costa de Cuba mediante la muestra de las funciones de distribución empíricas de los datos de reanálisis en verde, de los datos satelitales en azul y los datos de reanálisis calibrados en rojo. Como se puede comprobar, la metodología de calibración empleada consigue, en todos los casos, corregir la distribución de los datos de reanálisis, haciéndola más parecida a la de los datos instrumentales. Asimismo, se aprecia cómo GOW 2.0 tiende a subestimar las alturas de ola en la parte occidental (puntos 1, 6 y 7), mientras que tiende a sobreestimar los oleajes de la parte alta del régimen medio del punto más oriental (punto 4).

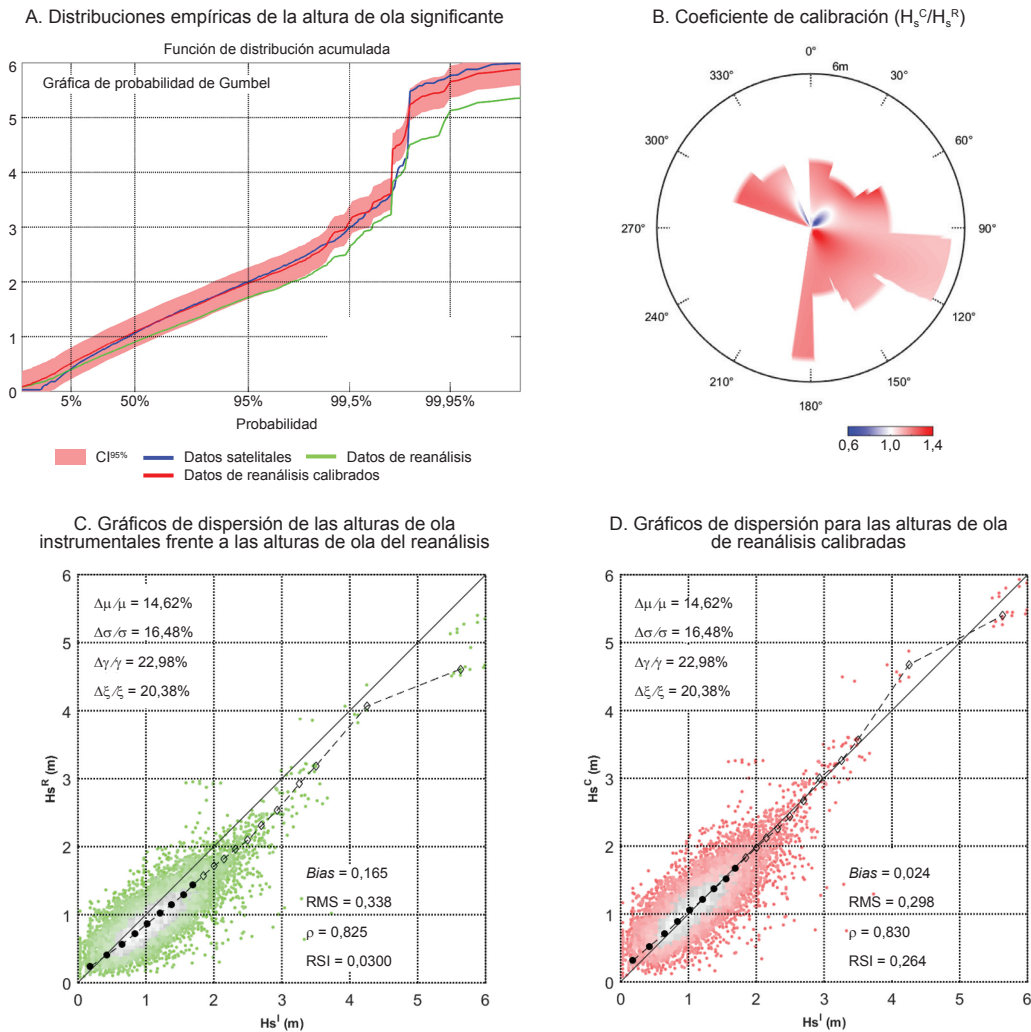
En el gráfico 9 se muestra en detalle la calibración del nodo GOW 2.0 [-76,25°; 19,25°] (marcado como 5 en el gráfico 8). Obsérvese cómo el coeficiente de calibración (definido como H_s^C/H_s^R) es positivo para todos los sectores direccionales (panel b). En los paneles inferiores se muestran las gráficas de dispersión de la altura de ola significativa antes (c) y después (d) de la calibración de los datos de reanálisis frente a los datos satelitales. Estas últimas gráficas demuestran la mejora de los datos de partida derivada de la calibración, como indican los estadísticos comúnmente empleados para evaluar el error (*bias* o sesgo, RMS o error medio cuadrático, ρ o coeficiente de correlación de Pearson, y RSI o índice de dispersión).

Gráfico 8
Distribuciones empíricas de la altura de ola significativa a lo largo de la costa de Cuba



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 9
Calibración del nodo GOW 2.0 [-76,25°; 19,25°] (punto 5 del gráfico 8)



Fuente: Elaboración propia.

La generación de los forzamientos del oleaje se realiza a partir de los espectros horarios calibrados en los nodos de la base de datos GOW2 indicados en el gráfico 5, que definen las condiciones de contorno de la malla de propagación del oleaje mediante el modelo SWAN. Estos espectros están discretizados en 32 frecuencias y 24 direcciones. La calibración de los espectros se realiza mediante la aplicación de un coeficiente de calibración específico en cada localización. Este coeficiente de calibración horario se define como el coeficiente entre la altura de ola de reanálisis calibrada y la altura de ola de reanálisis sin calibrar. La altura de ola de reanálisis calibrada se ha obtenido a partir de la metodología de calibración previamente definida.

C. Propagación del oleaje

A medida que el oleaje se aproxima a la costa, el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el oleaje se transforma. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación. La batimetría de la zona de estudio y la orientación de la costa respecto a los oleajes incidentes condicionan los fenómenos más relevantes que sufre el oleaje para cada caso particular. El

objetivo de los modelos de propagación consiste en aproximar el oleaje desde aguas profundas (modelo de oleaje global) hasta la costa.

Actualmente, los modelos de generación y propagación del oleaje de tercera generación se caracterizan por ser modelos promediados en fase, que resuelven la ecuación de balance de energía espectral. Este tipo de modelos, debido a su alta eficiencia computacional, permiten su aplicación en áreas extensas, siendo de esta forma posible el uso de una sola malla de cálculo para resolver el oleaje en toda la costa cubana. Para propagar el oleaje hasta la costa se ha elegido el modelo de SWAN (Booij, Ris y Holthuijsen, 1999), desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft. La base teórica de este modelo (resuelve la ecuación de acción de onda promediada en la fase y no la evolución de la superficie libre ola a ola) le confiere dos de sus principales atractivos. Por un lado, la posibilidad de propagar oleaje en cualquier dirección (en comparación con los modelos basados en la ecuación parabólica de pendiente suave) y, por otro, la posibilidad de resolver superficies extensas, ya que no requiere un número mínimo de puntos de cálculo por longitud de onda.

En este trabajo se ha usado la versión de SWAN 41.20, la cual, entre otras mejoras, incluye nuevas formulaciones para la generación de oleaje por viento introducida por Zijlema, van Vledder y Holthuijsen (2012). Además, resulta más adecuada para trabajar en zonas con ciclones tropicales y cuenta con mejoras en la resolución y cambios frecuenciales en mallas no estructuradas, mejor representación de los oleajes tipo *swell* y la integración de algoritmos de partición espectral.

Al igual que en los modelos de generación aplicados a escala global, en los modelos de propagación la calidad del oleaje modelado es altamente dependiente de la resolución. En este caso se ha optado por cubrir toda la costa de Cuba (aproximadamente unos 6000 km) con una resolución mínima de 1000 m, aumentando esta en zonas de especial interés como La Habana hasta los 100 m.

Para la ejecución del modelo se ha empleado una única malla no estructurada, que permite resolver a la vez y con resolución variable toda la costa de Cuba (véase el gráfico 7). La malla no estructurada tiene un total de 72.046 nodos necesarios para incrementar la resolución desde el contorno, un nodo GOW 2.0 cada ~25 Km, hasta alcanzar el orden de 1 km en cualquier zona de costa. Esta malla permite además definir zonas con diferente resolución espacial, como es el caso de las aguas de La Habana, donde se ha llegado a una resolución de 100 m, sin necesidad de anidar mallas de mayor detalle. La configuración de la malla final se determina por el compromiso entre la resolución mínima que se pretende obtener en la costa y un tiempo de ejecución asumible para simular más de 37 años (desde 1979 hasta 2017).

Con base en la distribución de los corales, se ha considerado el efecto de disipación de energía que producen estos ecosistemas que, con más o menos presencia, también gobiernan el oleaje a lo largo del litoral de Cuba. La disipación por fricción en el fondo se simula en el modelo SWAN mediante un término sumidero que representa una tasa de disipación de energía función de la velocidad orbital en el fondo (expresada en términos de la energía espectral del oleaje a partir de la teoría lineal del oleaje) y un coeficiente de fricción en el fondo.

$$S_{br}(f,\theta) = -C_{br} \left[\frac{2\pi f}{(g \cdot \sinh(kd))} \right]^2 E(f,\theta) \quad (3)$$

donde f es la frecuencia del oleaje, θ la dirección del oleaje, g la aceleración de la gravedad, k el número de onda y d la profundidad.

Para la definición de este coeficiente de fricción con el fondo se considera el modelo de viscosidad de remolino de Madsen (1998):

$$C_{br} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$$

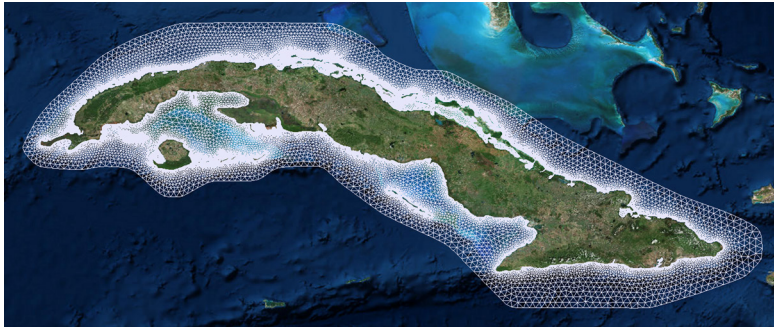
donde U_{rms} es la velocidad orbital cuadrática media del oleaje en el fondo y f_w el coeficiente de fricción propuesto por Jonsson (1967):

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{2}} \right) = -0.08 + \log_{10} \left(\frac{a_{b,r}}{K_w} \right)$$

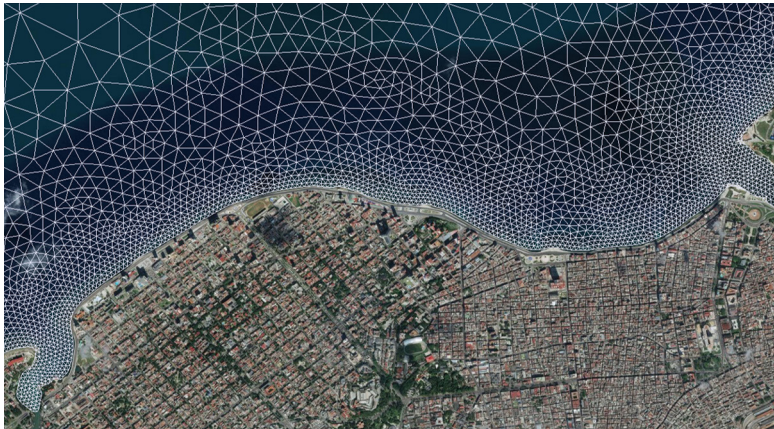
que, a su vez, depende del coeficiente de rugosidad K_w del fondo y la amplitud orbital en el fondo $a_{b,r}$. En las simulaciones realizadas se ha asumido un coeficiente de fricción variable en la malla de cálculo. Estos valores han sido establecidos según los trabajos de Sheppard y otros, 2005, donde se definen los valores recomendados de f_w en función del grado de presencia y de conservación del coral. Así, se ha considerado un valor de este coeficiente de 0,05 para fondo de arena y 0,16 para la barrera coralina (asumiendo ratios de supervivencia del coral de entre el 25% y el 50%).

Gráfico 10
Malla usada en Cuba y detalles de la bahía de La Habana y la bahía de Cárdenas

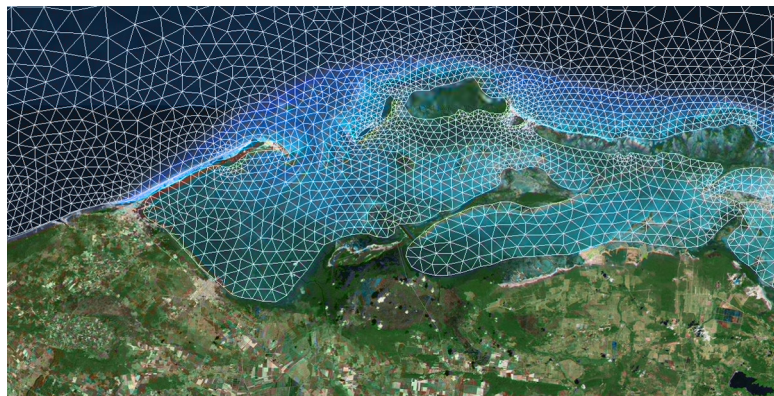
A. Malla no estructurada usada en las ejecuciones



B. Detalles de la bahía de La Habana



C. Detalles de la bahía de Cárdenas



Fuente: Elaboración propia.

IV. Validación

Antes de proceder a explicar la metodología de validación empleada, es conveniente describir las diferentes métricas estadísticas existentes para comparar los resultados de las simulaciones numéricas con los datos instrumentales de satélite.

- *Bias* o sesgo: este indicador expresa la diferencia media entre todos los pares de valores (instrumentales x_i vs. modelados y_i). Si el valor es negativo, los datos generados de media son inferiores a los reales (subestimación) y si es positivo ocurre lo contrario (sobrestimación). El sesgo viene definido por la siguiente expresión:

$$Bias = \sum_{i=1}^N \frac{y_i - x_i}{N}$$

- RMSE: error cuadrático medio. Mide el promedio de los errores al cuadrado, por lo que es una medida del error absoluto y no ofrece información del sentido hacia el cual es más probable el error. El RMSE viene definido por la siguiente expresión:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

- Para evitar la dependencia del RMSE con respecto a la magnitud de la variable analizada, se suele utilizar también el *Scatter Index* (SI) o índice de dispersión. Este representa el porcentaje de diferencia del RMSE con respecto al valor medio de los valores observados, siendo, por tanto, un indicador del error relativo. El SI se calcula como:

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}}$$

- Además del error es interesante explorar la correlación temporal entre los datos medidos y simulados, para ello se emplea el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente es independiente de la magnitud de las variables y es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. En nuestro caso de aplicación, cuanto más cercano esté a 1, más se parecerán los resultados generados a los datos instrumentales.

$$\rho = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

- El indicador *slope* o pendiente de la recta de mejor ajuste es el coeficiente de la regresión lineal entre los datos de satélite y el *hindcast* de oleaje obtenido. Aporta información sobre la relación lineal que existe entre los datos de oleaje generados por el modelo y los datos de observaciones de satélite. Un valor de este indicador próximo a 1 indica que el oleaje modelado reproduce perfectamente la realidad; valores positivos indican sobreestimación y negativos subestimación.
- Por último, el indicador *Brier Score Index* (B) permite analizar la mejora que se obtiene mediante el *downscaling* del oleaje, es decir, si la generación de la base de datos ROW Cuba tiene mayor precisión que la base de datos GOW2.0. El indicador B calcula según la relación de la varianza del error entre los datos del *hindcast* de alta resolución (ROW Cuba) con respecto a los datos de satélite (σ_F) y la varianza del error entre los datos de *hindcast* de menor resolución (GOW2) con respecto a los datos de satélite (σ_R). Cuanto más se aproxime B al valor 1, mayor es el valor añadido de los datos de alta resolución.

$$B = \begin{cases} 1 - \sigma_F^2 \sigma_R^{-2}; & \sigma_F^2 < \sigma_R^2 \\ \sigma_R^2 \sigma_F^{-2} - 1; & \sigma_F^2 > \sigma_R^2 \end{cases}$$

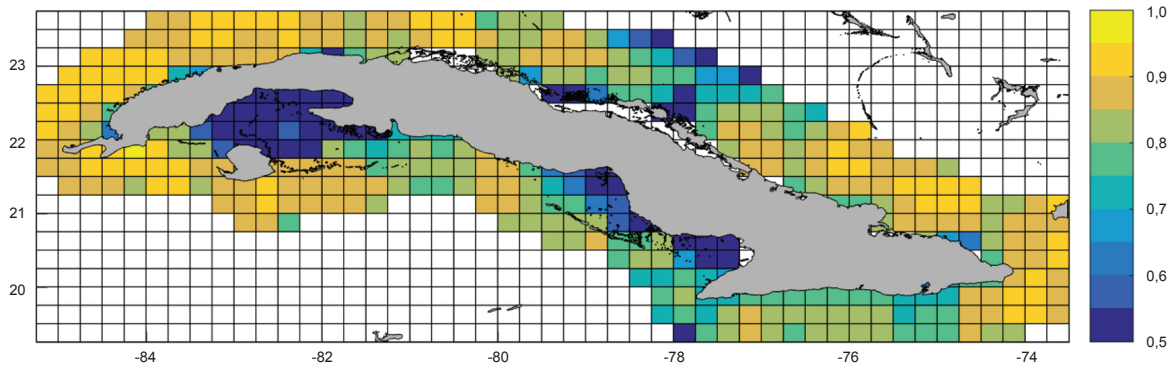
En el gráfico 11 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson, con valores del orden de 0,9 a lo largo de toda la isla, con excepción de zonas con menor profundidad (Archipiélago Sabana-Camagüey en el norte, Golfo de Batabanó y Golfo de Ana María-Guacanayabo en el sur), donde desciende a valores de 0,5. La relativamente baja correlación en estas zonas se debe fundamentalmente a dos motivos. En primer lugar, la altura de ola en las zonas indicadas está completamente condicionada por la profundidad, que en caso de eventos extremos suele aumentar debido a la marea meteorológica o *storm surge*, variación del nivel del mar que no está siendo resuelta por el modelo empleado. Por otro lado, los datos de altimetría satelital (que derivan Hs a partir de la rugosidad de la superficie) dejan de ser válidos en zonas con presencia de islas o bajos emergidos, por lo que los valores resultantes de la validación deben ser tomados con mucha cautela en estas zonas.

En el gráfico 12 se muestra el sesgo (*bias*), que indica que los datos modelados sobreestiman ligeramente la altura de ola en el contorno superior debido a la presencia del Gran Banco de las Bahamas. Por otro lado, se observa una ligera subestimación en zonas próximas a la costa. Como se ha comentado anteriormente, el uso de datos de altimetría en zonas muy próximas a la costa debe ser evitado en la medida de lo posible. Sin embargo, el patrón de subestimación identificado en las cercanías de la costa (siempre inferior a los 15 cm) se relaciona con un sesgo negativo de la velocidad del viento derivado de una resolución insuficiente del relieve cubano o una mala parametrización de su rugosidad.

Respecto al SI, que se muestra en el gráfico 13, se puede observar que el valor medio a lo largo de la isla es del orden de 0,2-0,25, alcanzando valores del orden de 0,5 en las zonas de menor profundidad, que se corresponden con las de menor coeficiente de correlación. El indicador *slope*, mostrado en el gráfico 14, presenta valores próximos a 1 a lo largo de toda la isla, con un patrón similar al *bias* en relación con la sobreestimación/subestimación de los valores observados en la altura de ola.

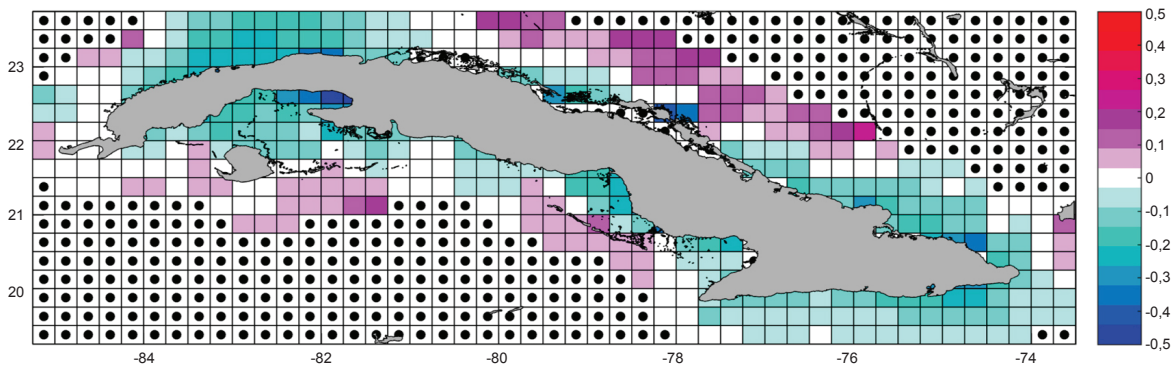
Los resultados más significativos de la validación de la reconstrucción del oleaje a lo largo de la costa de Cuba se obtienen con el indicador *Brier Score Index*, que se muestra en el gráfico 15. Se puede observar cómo los valores son positivos prácticamente a lo largo de toda la costa, alcanzándose magnitudes de 0,6, lo que nos indica que el *downscaling* dinámico de los datos de oleaje (ROW Cuba) supone una mejora considerable respecto de los datos GOW2 debido a la simulación de los procesos de propagación a una mayor resolución espacial.

Gráfico 11
Coefficiente de correlación de Pearson de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba



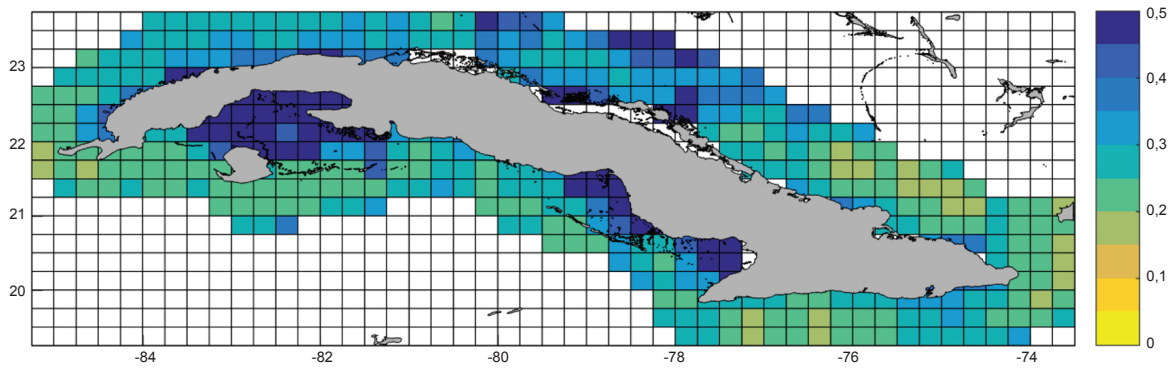
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12
Sesgo (*bias*) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba
(En metros)



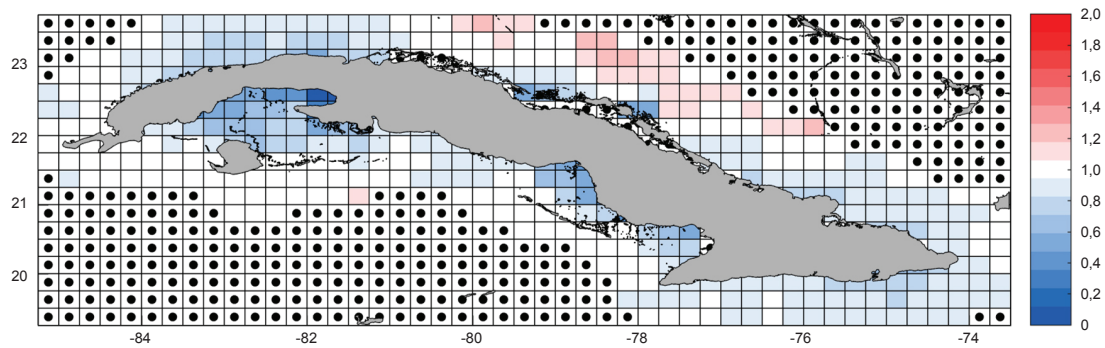
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 13
Índice de dispersión (*scatter index* (SI)) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba



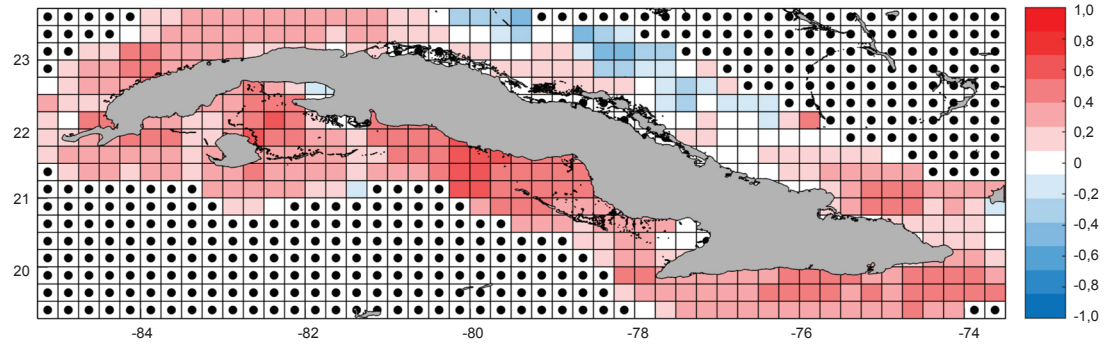
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14
Pendiente (slope) de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba



Fuente: Elaboración propia.

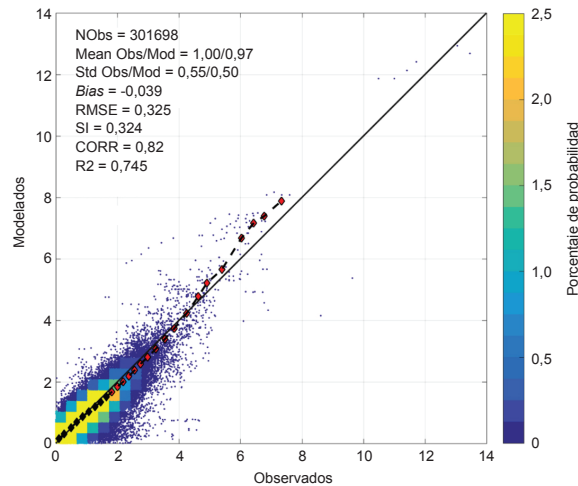
Gráfico 15
Indicador *Brier Score Index* de la altura de ola de la base de datos ROW Cuba frente a los datos de GOW2



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 16 se muestra el gráfico de dispersión de los datos satelitales frente a los datos obtenidos a partir de modelado numérico en todo el dominio. Se puede observar una alta concordancia de los datos generados con las observaciones para todo el rango de valores de la altura de ola, desde las condiciones más probables (valores de la altura de ola entre 0,0 y 2,0 m) a los eventos más extremos (alturas de ola del orden de los 12,0 m).

Gráfico 16
Dispersión de todos los pares de datos de la altura de ola de la base de datos históricos generada a lo largo del litoral de Cuba frente a los datos observados

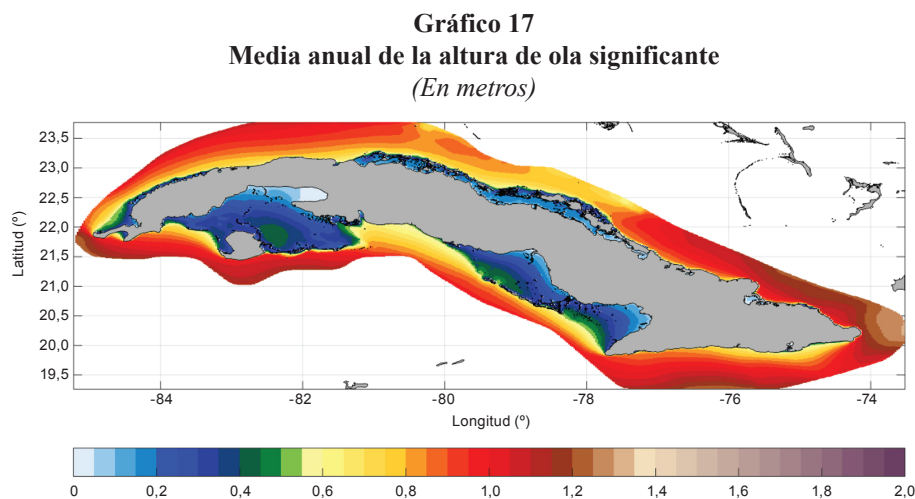


Fuente: Elaboración propia.

V. Caracterización climática del oleaje

Gracias a las características de la base de datos históricos del oleaje a lo largo de la costa de Cuba que se ha generado (homogénea espacialmente y larga en el tiempo), se puede caracterizar climáticamente el oleaje por medio de mapas espaciales de determinados parámetros estadísticos de estado de mar y, de forma puntual, a partir de diferentes estadísticos descriptivos unidimensionales (por ejemplo, gráficos de estacionalidad) o bidimensionales (por ejemplo, histogramas de probabilidad conjunta o rosas de oleaje, entre otros).

En el gráfico 17 se muestra la media anual de la altura de ola significativa a lo largo de la costa de Cuba. Los valores máximos de altura de ola media (del orden de 1,3 m) se alcanzan en el extremo oriental de la isla debido al canal existente entre la isla de Gran Inagua y Haití, que permite la incidencia de los oleajes persistentes del este generados por el anticiclón subtropical.



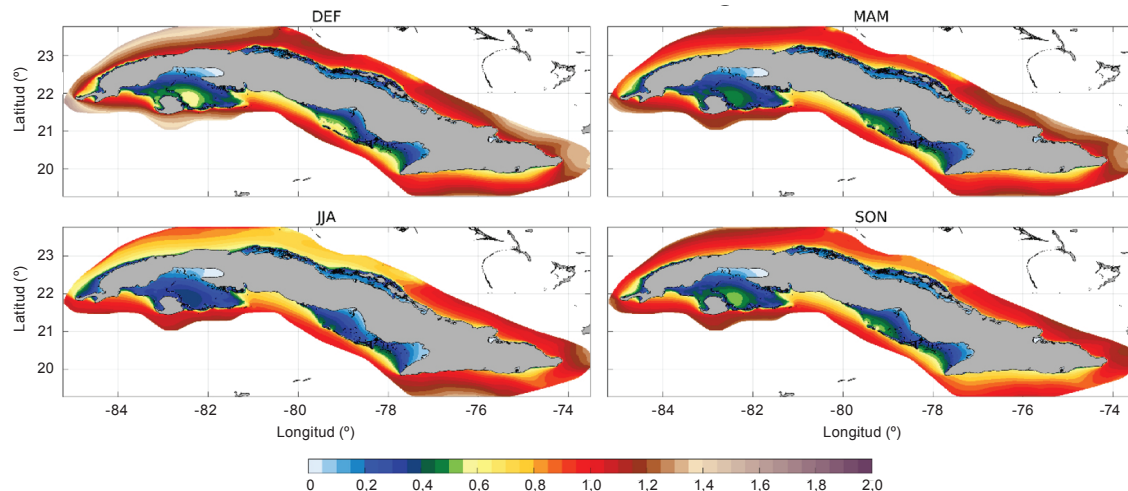
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se puede apreciar el efecto de bloqueo del oleaje (o limitación del crecimiento por viento) debido a las limitaciones por profundidad impuestas por el Gran Bajo de las Bahamas en la zona central de la costa norte (entre Cayo Santa María y la Ensenada de Cordera). Por otro lado, a pesar de que la costa sur está protegida frente a la dinámica predominante de la zona (los vientos alisios asociados al anticiclón subtropical soplan con dirección tierra-mar), la altura de ola media en aguas más profundas

alcanza valores superiores a 1,0 m, fundamentalmente frente a Santiago de Cuba, debido a la incidencia de oleajes parcialmente desarrollados generados en el Mar Caribe y capaces de propagarse entre Jamaica y Haití. Cabe mencionar la reducción de la altura de ola media que se produce en las zonas someras con presencia de barreras coralinas: archipiélago Sabana-Camagüey en el norte, Golfo de Batabanó y Golfo de Ana María-Guacanayabo en el sur, donde la presencia de manchas de coral y crestas coralinas no solo producen la rotura y limitan el crecimiento del oleaje, sino que además son muy eficaces disipando su energía por fricción con el fondo.

En el gráfico 18 se muestra la estacionalidad de la altura de ola media. A pesar de estar en las latitudes tropicales, se aprecia una estacionalidad invierno-verano muy marcada, derivada de las variaciones estacionales (intensidad y posición) del anticiclón de las Azores y la mayor o menor actividad extratropical en el Golfo de México (frentes fríos). Así, se aprecia una diferencia de más de 0,6 m en las alturas de ola media del invierno y el verano en la zona nororiental, debida fundamentalmente al paso de borrascas extratropicales y sus frentes fríos asociados durante los meses de invierno.

Gráfico 18
Media estacional de la altura de ola significativa
(En metros)

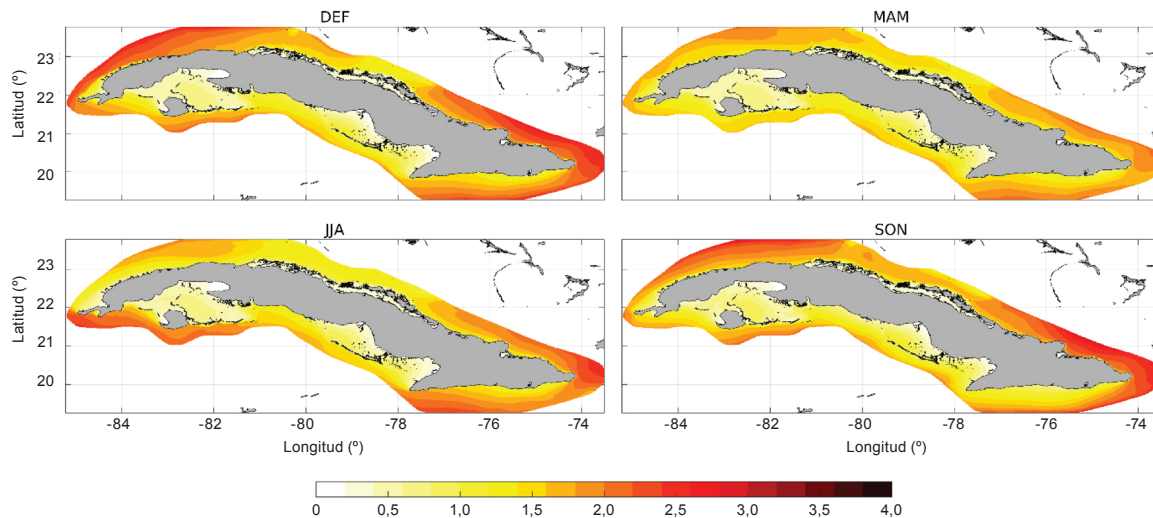


Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones medias en el extremo oriental de la isla presentan menores variaciones estacionales debido a la alta persistencia de las altas presiones y los vientos del Este asociados. Así, se aprecian anomalías positivas del orden de 0,2 m durante el invierno (DEF) y la primavera (MAM), con respecto al verano (JJA) y otoño (SON), siendo esta la estación de menor dominancia de las altas presiones.

Para obtener una descripción del oleaje extremal, en el gráfico 19 se muestran los mapas estacionales del percentil 99% de la altura de ola significativa, que son muy similares a los de la altura de ola media. En este caso los valores máximos del percentil 99% son del orden de 2,5 m, observados tanto en la costa nororiental como occidental. En la costa nororiental las variaciones de los oleajes extremos durante el invierno están fuertemente ligados a la incidencia de los frentes fríos, con vientos asociados del noroeste en el Golfo de México. Es importante señalar los altos valores de $H_{s,99\%}$ que se aprecian en otoño a pesar de que la $H_{s,media}$ muestra valores mínimos en esta estación. Esta discrepancia obedece a que los ciclones tropicales (a pesar de no estar suficientemente representados en el reanálisis) son más frecuentes a principios del otoño, tendiendo a incidir en el área noroeste de la isla. Del mismo modo, el aumento en la altura de ola extremal observado en la costa sur durante los meses de verano se debe a la mayor probabilidad de ocurrencia de tormentas o perturbaciones tropicales (*easterly waves*) al sur de Cuba durante los meses de julio y agosto.

Gráfico 19
Percentil 99% por estaciones de la altura de ola significativa
(En metros)

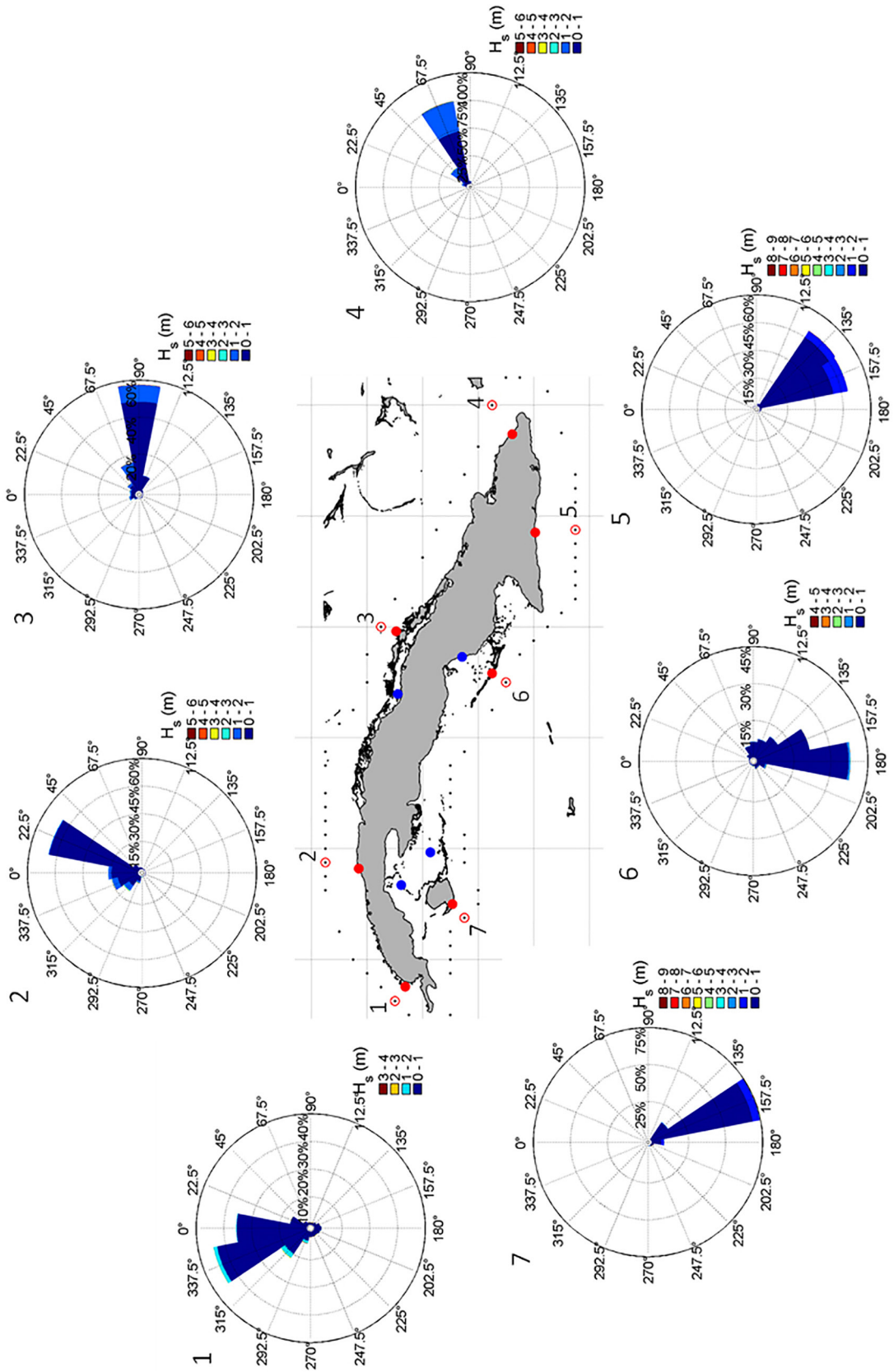


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 20 se muestra la distribución espacial de la direccionalidad del oleaje. A pesar de que en los puntos analizados el oleaje se encuentra muy modificado por el fondo y los contornos de tierra (el oleaje siempre tiende a adoptar direcciones perpendiculares a la costa), se aprecia cómo la dirección media del oleaje en toda la costa de Cuba está marcada por los vientos alisios, con direcciones dominantes del primer y segundo cuadrante.

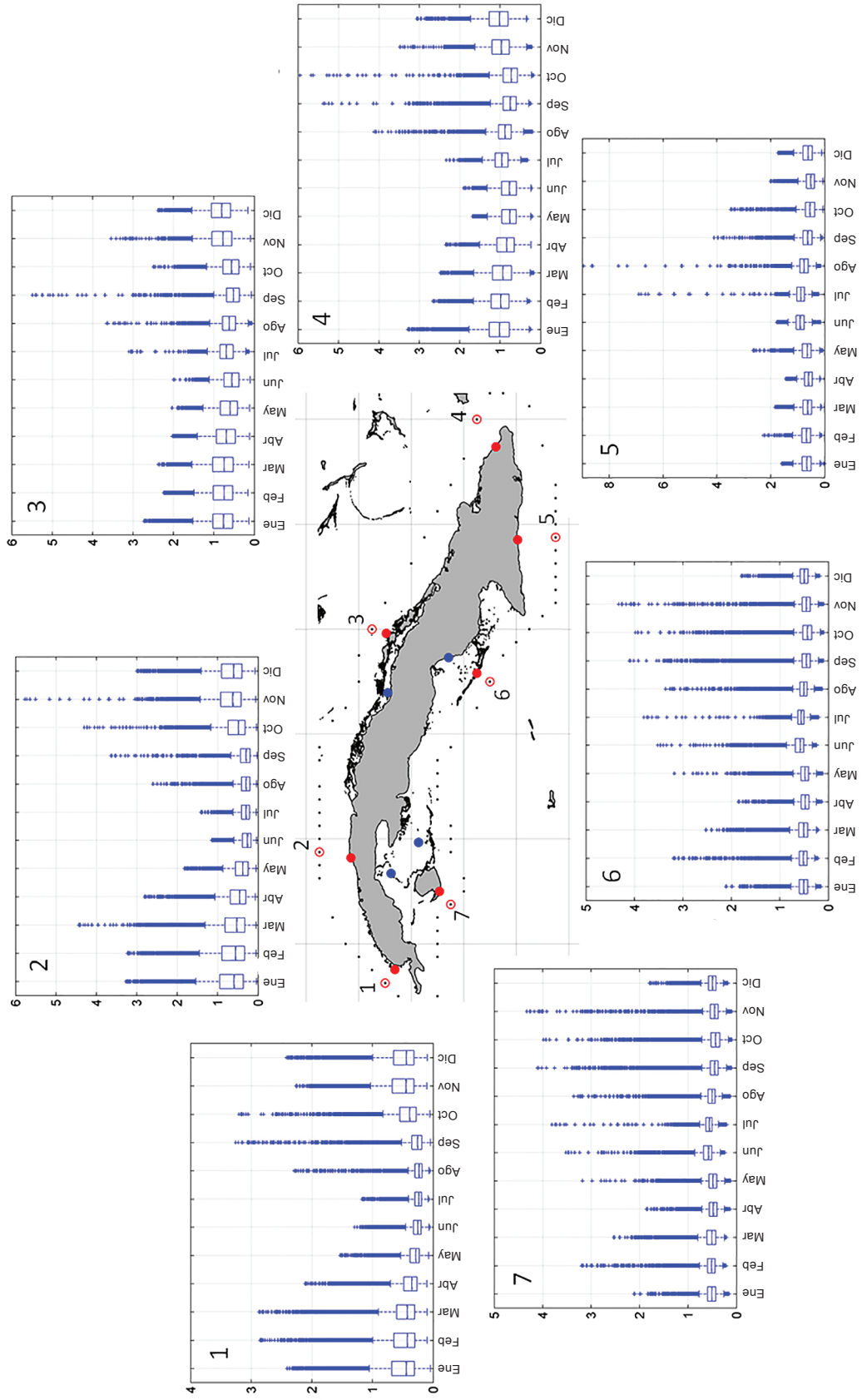
En el gráfico 21 se muestra la estacionalidad de la altura de ola significativa en las mismas localizaciones que se muestran en el gráfico 22. En este caso, para una mejor caracterización del oleaje, se ha optado por mostrar los resultados mediante un diagrama de cajas, donde la marca central es la mediana y los bordes los percentiles 25% (Q1) y 75% (Q3). Las líneas se extienden desde la caja hasta 1,5 veces el RIC (rango intercuartílico, $Q3 - Q1$). Valores inferiores o superiores a estos límites se consideran datos atípicos, representados por asteriscos. El objetivo de este gráfico es mostrar la estacionalidad, no solo de los valores medios, sino que además permite identificar valores atípicos que, en su mayoría, se corresponden con ciclones tropicales. Mediante estos gráficos, en los puntos 1 y 2 se aprecian eventos extremos durante el invierno (DEF) generados por tormentas extratropicales y, durante los meses de agosto, septiembre y octubre, principalmente, ocasionados por huracanes. La estacionalidad de los eventos extremos se limita a la época de huracanes en las localizaciones 3, 4 y 5. Respecto a las posiciones 6 y 7, se observa una incidencia temprana de los extremos, alcanzándose valores de altura de ola de similar magnitud durante los meses de mayo, junio y julio. A pesar de que oficialmente la época de huracanes comienza en junio, durante los meses de mayo y junio son frecuentes los vientos intensos del ESE asociados a perturbaciones tropicales (ondas del este) que son el prelude de la formación de huracanes en caso de que se produzcan las condiciones adecuadas. Estas ondas del este son perturbaciones atmosféricas ondulatorias con un comportamiento cuasiperiódico. Se generan dentro del régimen de vientos alisios en el hemisferio norte durante el verano boreal y están relacionadas con la circulación ciclónica y la convergencia de las masas de aire en los niveles inferiores de la atmósfera. Se propagan hacia el oeste, desde la costa africana a lo largo del Océano Atlántico, llegando finalmente a aguas del Caribe.

Gráfico 20
Direccionalidad del oleaje a lo largo de la costa de Cuba



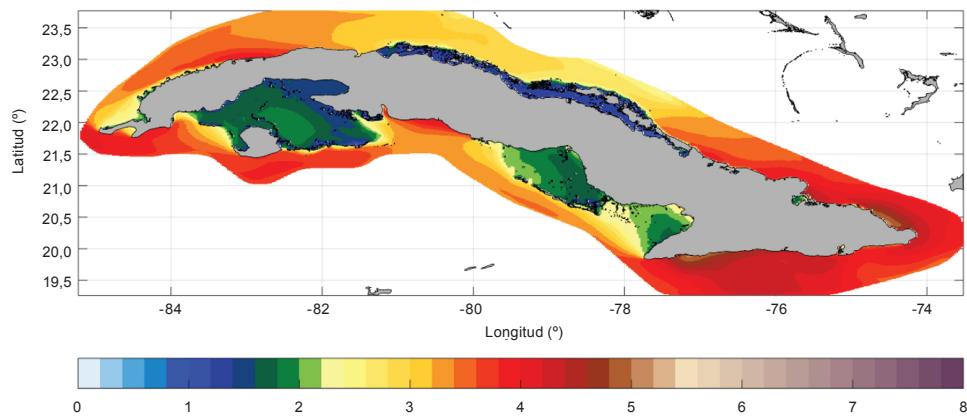
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 21
Estacionalidad de la altura del oleaje a lo largo de la costa de Cuba
(En metros)



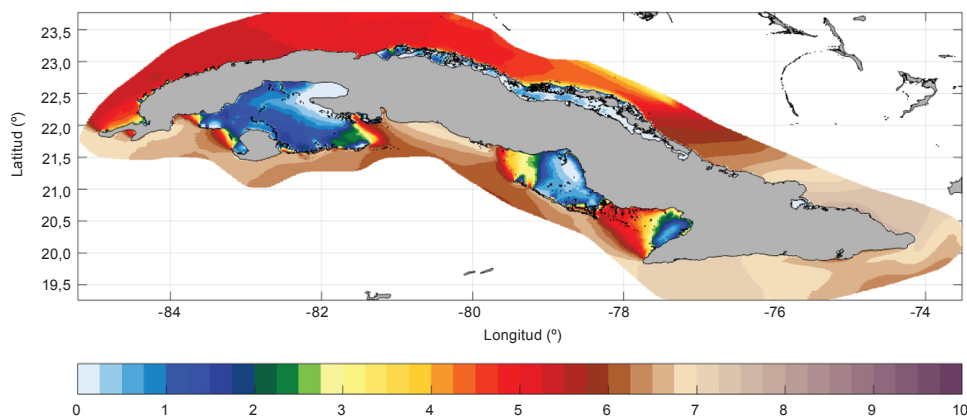
En el gráfico 22 y el gráfico 23 se muestra la media anual del período medio y el período de pico del oleaje, respectivamente. En ambos gráficos se puede observar cómo los dos períodos son mayores en la costa sur y extremo oriental de la isla, excepto en las zonas protegidas por la barrera coralina (Golfo de Batabanó y Golfo de Ana María-Guacanayabo). Sorprende que, en estas zonas someras, el período medio (en torno a los 2,0 segundos) sea mayor que el período de pico (en torno a 1,0 segundos). Esta situación inusual se debe a que el período de pico indica que la energía más significativa está generada localmente y que además existen otros paquetes de energía concentrados en períodos mayores (olas pequeñas de mayor período que son capaces de atravesar las crestas coralinas sin llegar a romper), que condicionan que el período medio sea mayor que el de pico. En la costa norte, se observa un período medio y de pico mayor en la parte noroccidental que en la zona central debido a la disponibilidad de un área oceánica mayor para la generación de oleaje. En la zona protegida por el archipiélago Sabana-Camagüey se observa un comportamiento similar con el período medio y de pico que en los dos golfos de la costa sur de la isla.

Gráfico 22
Media anual del período medio del oleaje
(En segundos)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23
Media anual del período de pico del oleaje
(En segundos)



Fuente: Elaboración propia.

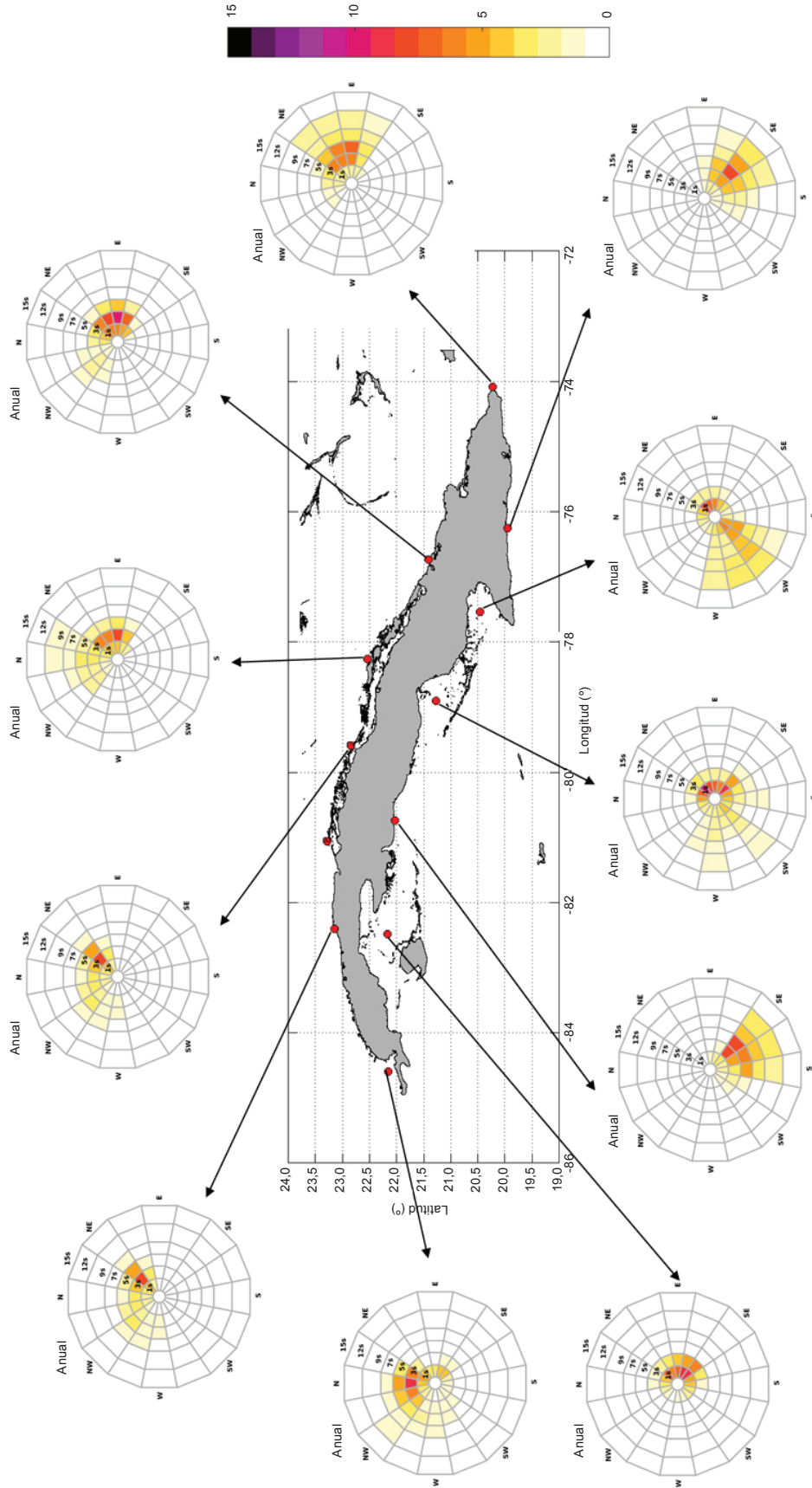
La variabilidad espacial de la energía espectral media a lo largo del litoral de Cuba se muestra en el gráfico 24. En la costa norte de la isla se aprecia cómo la energía del oleaje se concentra en períodos bajos (3-5 segundos) de dirección noreste (generada por los vientos alisios). En las localizaciones más occidentales se puede apreciar un componente de la energía del noroeste generada por la dinámica extratropical del Golfo de México. Respecto de la costa sur, se diferencian dos tipos de oleajes según la distribución de la energía espectral derivada de una localización en las zonas protegidas por los golfos de Batabanó, de Ana María-Guacanayabo o en zonas más expuestas. En las zonas protegidas los componentes más energéticos se corresponden con períodos del orden de 1,0 segundos y direcciones del noroeste, como consecuencia de una generación local del oleaje. Además, existe energía en mayores períodos en direcciones del suroeste, procedente de oleajes generados en la cuenca sur del Caribe, que han podido penetrar en estas zonas protegidas. Esta composición del oleaje confirma la identificación de períodos de pico menores que el período medio en estas zonas someras, descritos previamente. En cuanto a la distribución de la energía espectral en las otras dos localizaciones del sur más expuestas, la concentración del oleaje se produce alrededor de períodos de 3,0-5,0 segundos con una dirección del sureste.

Por último, para ofrecer una información sistemática más detallada a lo largo de toda la costa, se ha caracterizado el régimen medio y extremal del oleaje en una serie de localizaciones equiespaciadas a las profundidades 4,0-8,0 m y 20,0-40,0 m, resultados que se muestran en forma de fichas estandarizadas y se recogen en el anexo de este documento. Allí se presentan algunos ejemplos de las fichas elaboradas.

A continuación, se realiza una descripción detallada de estas fichas de caracterización del oleaje: régimen medio y régimen extremal. En primer lugar, se describe el panel lateral derecho, común a ambas fichas (véase el gráfico 25). El panel lateral común a todas las fichas consta de varios paneles, de arriba abajo: el panel superior contiene cuatro líneas de texto en las que se describe el contenido de las fichas: caracterización del clima marítimo como título general de las fichas; la dinámica que se caracteriza (oleaje); el tipo de caracterización (régimen medio o régimen extremal) y la base de datos que se utiliza para la realización del contenido de la ficha, en este caso la base de datos ROW Cuba, que cubre un período de reanálisis que va desde 1979 hasta el 2016; en el siguiente panel se muestra un mapa de la zona de estudio con la ubicación del punto que se está caracterizando con la correspondiente ficha; en el tercer panel figura el detalle de la localización del punto en estudio, junto con las coordenadas exactas de su ubicación (longitud, latitud) y el calado del punto en dichas coordenadas (h) y los nodos de la malla de computación en la zona próxima; el quinto panel detalla el modelo de propagación utilizado (SWAN 41.20), las características de los forzamientos, en este caso la base de datos GOW 2.0, con una resolución de malla de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, calibrada con datos de satélite y realizada con el modelo WaveWatch III en su versión 4.18 y los datos de viento de la base de datos CFSR con una resolución espacial de $0,312^{\circ}$ para el período 1979-2010 y $0,204^{\circ}$ para el período 2011-2016; en el panel inferior se ha incorporado el logo de IHCantabria.

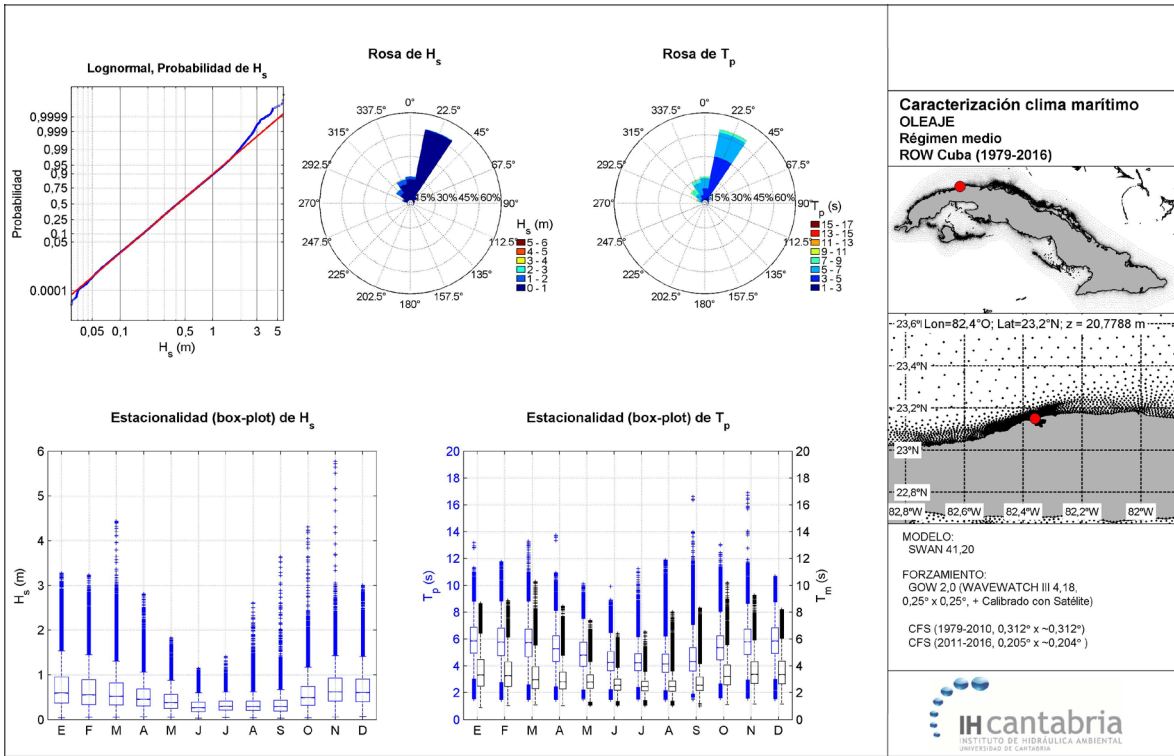
En el gráfico 25 se muestra un ejemplo de la ficha para la caracterización del régimen medio del oleaje. En el panel superior izquierdo se muestra el ajuste del régimen medio de la altura de ola significativa. Los datos empíricos se han representado en azul, el ajuste a una distribución *lognormal* en rojo. En los otros dos paneles superiores se muestran las rosas direccionales de altura de ola significativa y período de pico, respectivamente, en las que se han considerado sectores direccionales de $22,5^{\circ}$ y que dan información de las direcciones predominantes de oleaje y de los valores predominantes dentro de esas direcciones. En los paneles inferiores se muestra la estacionalidad de la altura de ola y períodos medios y de pico, respectivamente. Se han representado mediante un diagrama de cajas, donde la marca central es la mediana y los bordes los percentiles 25% (Q1) y 75% (Q3). Las líneas se extienden desde la caja hasta 1,5 veces el RIC (rango intercuartílico, $Q3 - Q1$). Valores inferiores o superiores a estos límites se consideran datos atípicos, representados por asteriscos.

Gráfico 24
Espectro medio a lo largo de la costa de Cuba
(En segundos)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 25
Ejemplo de ficha del régimen medio de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba

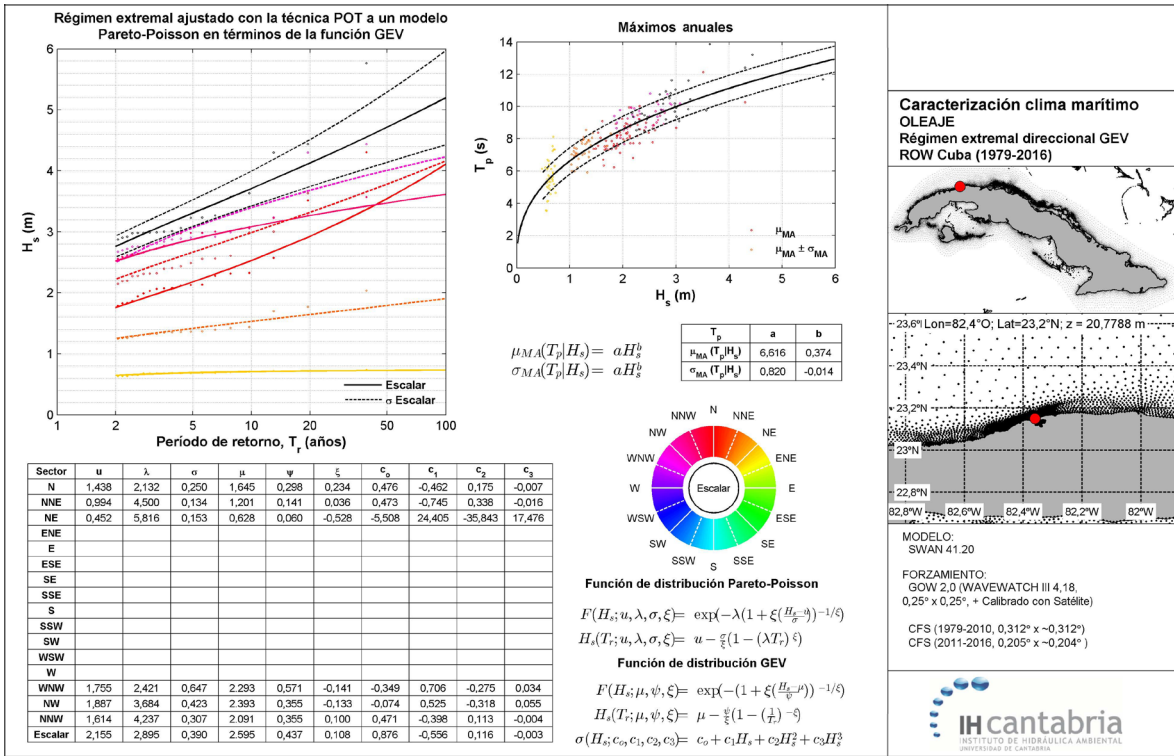


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 26 se muestra un ejemplo de la ficha del régimen extremal direccional de la altura de ola. Los regímenes extremales direccionales de altura de ola significativa se han representado en el panel 1; los puntos son los máximos direccionales de la serie seleccionados mediante el método POT (picos sobre un umbral); las líneas son el ajuste a estos puntos en cada dirección, que se ha realizado mediante una función de distribución Pareto-Poisson definida en términos de la función generalizada de extremos (Méndez y otros, 2006). También se ha realizado el ajuste para la totalidad de los datos sin tener en cuenta la direccionalidad del oleaje (ajuste escalar, línea negra). En la parte inferior del panel 5 se muestra la ecuación de la función de distribución considerada. Los parámetros que han resultado de los ajustes se han recogido en el cuadro del panel 3. Asimismo, con el objeto de relacionar los valores de pico asociados a los valores extremos de altura de ola significativa, en el panel 2 se muestra la relación entre los valores máximos direccionales de altura de ola significativa y sus correspondientes períodos de pico (puntos de colores), su valor medio μ_{MA} (línea negra) y su banda de confianza $\mu_{MA} \pm \sigma_{MA}$ (línea discontinua negra). Se ha considerado que el valor medio μ_{MA} y la desviación típica σ_{MA} varían en función de la altura de ola mediante una ley potencial, cuya ecuación heterocedástica y valores de ajuste se recogen en el panel de la derecha.

Gráfico 26

Ejemplo de ficha del régimen extremal (POT-GEV) de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba

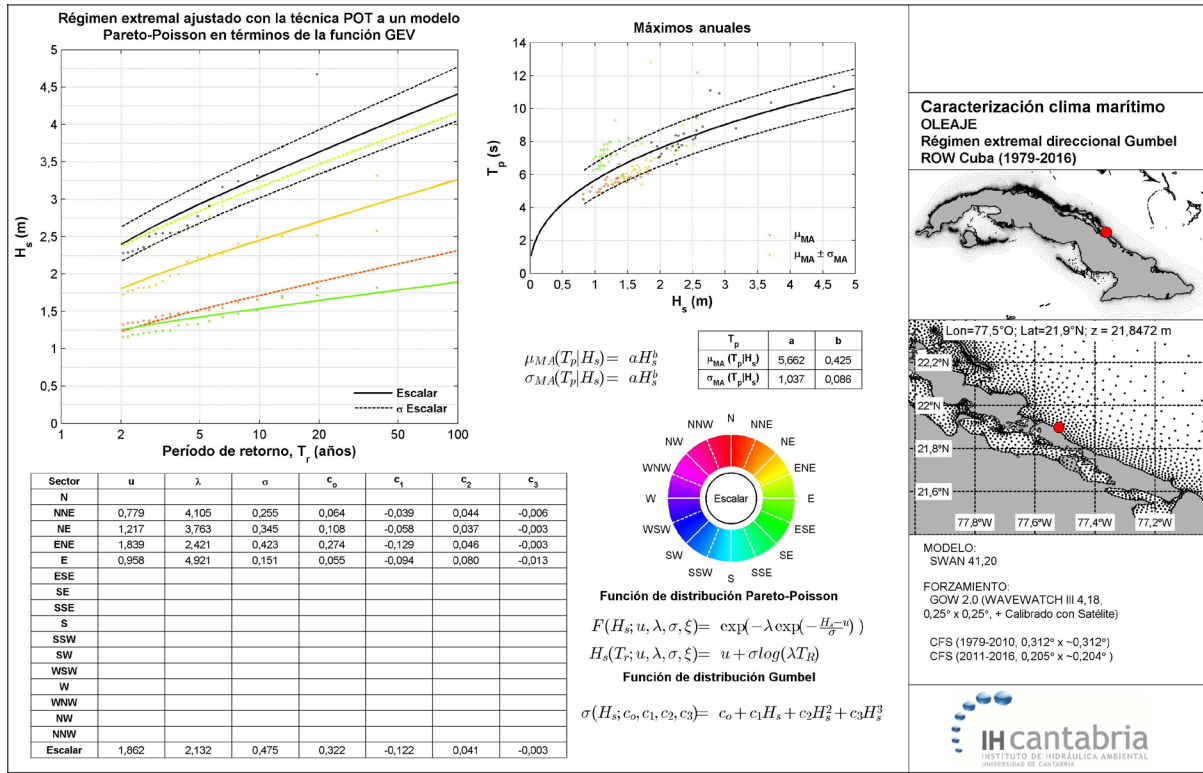


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 27 se muestra otro ejemplo de la ficha del régimen extremal direccional de la altura de ola. En este caso, el ajuste de los máximos escalares/direccionales de la serie también se han seleccionado mediante el método POT, pero se ha forzado a que el ajuste sea de tipo Gumbel (parámetro de forma $\xi = 0$). El ajuste de Gumbel supone que la cola de la distribución decae exponencialmente.

La incorporación de las dos fichas en la caracterización del clima marítimo extremal obedece a que parte de los eventos extremos están asociados a huracanes. El problema que presenta la caracterización del régimen extremal cuando existen extremos de este origen es la escasez de eventos para aplicar un ajuste de extremos. La estimación de un ajuste extremal robusto implica la generación de huracanes sintéticos y la modelización de las dinámicas marinas (oleaje) generadas por estos huracanes para ampliar la muestra de eventos con los que realizar la caracterización del régimen extremal. En este trabajo, el ajuste se ha limitado a los extremos históricos del período que cubre el hindcast de oleaje. En esta muestra histórica están mezcladas diferentes familias de extremos con diferente origen (generados por huracanes, tormentas extratropicales y temporales del sur asociados a las ondas del este). Se considera que la aplicación de una función de distribución Pareto-Poisson definida en términos de la función generalizada de extremos (POT-GEV) dará lugar a un ajuste de tipo Fréchet para el régimen escalar y algunas de las direcciones (véase el ejemplo del gráfico 26). Este ajuste está condicionado por los eventos de huracanes y su escasa frecuencia de presentación. Al no estar la cola de la distribución acotada se puede estar sobreestimando los períodos de retorno superiores a 50 años (período no cubierto por los datos históricos). Por este motivo, se ha optado por representar también el ajuste a una Gumbel para obtener períodos de retorno con una cierta limitación en su extrapolación a partir del ajuste. La comparación de ambos ajustes puede aportar una información más ajustada de la estimación de los períodos de retorno de la altura de ola significativa.

Gráfico 27
Ejemplo de ficha del régimen extremal (POT-Gumbel) para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba



Fuente: Elaboración propia.

VI. Proyecciones de oleaje de cambio climático

Los escenarios globales de cambio climático son la principal fuente de información disponible para llevar a cabo estudios de impacto. Estos escenarios se elaboran utilizando modelos fisicomatemáticos del clima (modelos de circulación general (GCM)), que simulan la dinámica conjunta del sistema climático sometido al forzamiento de distintos escenarios hipotéticos de emisión de gases de efecto invernadero en el futuro. Las proyecciones globales se llevan a cabo periódicamente (cada cinco años aproximadamente) de forma coordinada, contando con la participación de decenas de centros internacionales de modelización numérica del clima, cada uno de los cuales aporta su propio modelo (IPCC, 2013). Estas simulaciones caracterizan la evolución diaria (o incluso intradiaria) de numerosas variables climáticas de interés (presión, temperatura y humedad, entre otras), tanto en superficie como en distintos niveles verticales de la atmósfera. Sin embargo, estos modelos no simulan el oleaje. Además, la principal limitación de los escenarios globales de cambio climático es su escasa resolución espacial (cientos de kilómetros). La resolución de campos de viento superficiales derivados de modelos de circulación general es a menudo demasiado grosera para forzar modelos de oleaje regionales.

Por tanto, la tarea de regionalizar estos escenarios es clave para poder llevar a cabo estudios de impacto y adaptación a nivel regional y en especial en la costa. Se utilizan dos metodologías en la regionalización (o *downscaling*): el método dinámico y el método estadístico. El *downscaling* dinámico, basado en el anidamiento de modelos numéricos, es quizás la metodología más utilizada (véanse Erikson y otros, 2015; Hemer, Katzfey y Trenham, 2013; Mori y otros, 2010; Semedo y otros, 2013). El *downscaling* estadístico está basado en el uso de modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica en gran escala (dadas por un GCM) con las variables locales/regionales de interés, observadas en superficie. Ambas aproximaciones proporcionan resultados similares, pero se pueden obtener mejores resultados mediante los métodos estadísticos si se implementan ciertas correcciones (Wang, Swail y Cox, 2010). Por otra parte, la regionalización dinámica es muy costosa computacionalmente y presenta el problema adicional con respecto a los datos procedentes de GCM de falta de calidad y resolución espacial y temporal de los campos de viento sobre la superficie del mar (principal forzamiento del oleaje). Por lo tanto, la mayoría de los estudios de proyecciones de oleaje dinámicos se basan en solo uno o unos pocos GCM (véanse Mori y otros, 2010; Semedo y otros, 2013). Por el contrario, la metodología estadística requiere un menor esfuerzo computacional y permite analizar un gran número de simulaciones. El análisis de múltiples GCM y escenarios climáticos es muy importante para obtener no solo una estimación del cambio, sino del grado de consenso entre los distintos modelos y escenarios, y poder caracterizar la incertidumbre asociada.

Los distintos escenarios climáticos están basados en trayectorias de concentración representativas (RCP) (Moss y otros, 2010) de gases de efectos invernadero (GEI), utilizados en el quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Fifth Assessment Report, AR5). En la actualidad existen cuatro escenarios RCP con los que trabaja la comunidad científica. Cada uno de ellos representa distintas evoluciones de las concentraciones de GEI a lo largo del siglo XXI; así, el RCP2.6 representa un escenario optimista con bajas concentraciones de GEI, los escenarios RCP4.5 y RCP6.0 representan escenarios moderados con concentraciones de GEI que se estabilizan antes (RCP4.5) y después (RCP6.0) del año 2100 y, por último, el RCP8.5 representa un escenario pesimista con altas concentraciones de GEI. En este informe se analiza el escenario RCP8.5, donde se esperan los mayores cambios en el oleaje.

A. Metodología

La estimación de las proyecciones de cambio climático del oleaje para diferentes escenarios socioeconómicos y el cambio estimado a corto, medio y largo plazo durante el siglo XXI conlleva una serie de tareas que se describen a continuación:

- Recopilación y procesamiento de bases de datos históricos del predictor (variables de circulación atmosférica de gran escala) y predictando (variables locales de interés, en este caso, los parámetros de estado de mar) para la calibración y validación del método de *downscaling* estadístico.
- Desarrollo de un modelo estadístico para la proyección del oleaje. Se aplica un método de *downscaling* estadístico basado en tipos de tiempo (situaciones sinópticas) con un bajo costo computacional y capaz de reproducir el oleaje multivariado (Camus y otros, 2014). El oleaje local está formado por oleaje de tipo *swell* generado lejos de la zona local de estudio y oleaje de viento, generado localmente. Por tanto, es necesario caracterizar el área de influencia del oleaje global en el oleaje local, en especial, áreas donde se genera/disipa la energía que llega hasta un punto objetivo y los tiempos de propagación de esta energía.
- Obtención de las proyecciones multimodelo de oleaje a partir de los GCM seleccionados para distintos escenarios de cambio climático. El modelo de *downscaling* estadístico planteado predice los cambios en el clima local (predictando: oleaje y marea meteorológica) a partir de los cambios en el predictor (atmósfera), lo que permite una mejor comprensión del clima.

1. Datos históricos y proyecciones de cambios climáticos

a) Datos históricos de presiones a nivel del mar

Para la definición del predictor se utilizan los campos de presiones a nivel del mar (*sea level pressure*) de la base de datos CFSR (1979-2010) y CFSRv2 (2011-2017) (Saha y otros, 2014). Los datos de 1979 a 2015 a resolución horaria se utilizan a una resolución espacial de 2,0°.

b) Datos históricos de oleaje

Para la definición del predictor se utiliza la base de datos de oleaje *offshore* que ha definido el forzamiento de la base de datos históricos generados a lo largo del litoral de Cuba. La base de datos GOW2 desarrollada por IHCantabria (Pérez, Menéndez y Losada, 2017) proporciona los datos históricos horarios del oleaje como: altura de la significativa (Hs), período de pico del oleaje (Tp), dirección media del oleaje (θ m) a una resolución espacial de 0,5° a escala global y 0,25° en la plataforma continental a lo largo de la costa de todo el mundo desde 1979 hasta la actualidad. En el desarrollo del modelo de *downscaling* estadístico se han utilizado los datos a una resolución espacial de 1,0° desde 1979 hasta 2015.

c) Proyecciones de cambio climático

Los campos diarios de presiones al nivel del mar de los GCM de la fase 5 del proyecto de intercomparación CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) se utilizan para estimar los cambios en el predictor. Los datos del período histórico de 1975 a 2004 permiten caracterizar las condiciones del pasado más reciente. Los datos del RCP8.5 del período 2070-2100 representan las condiciones futuras de largo plazo. En este estudio se han considerado un total de 30 GCMs (véase el cuadro 1). Los datos utilizados se han obtenido a partir de Earth System Grid–Center for Enabling Technologies (ESG-CET, <http://pcmdi9.llnl.gov/>).

Cuadro 1
Modelos de circulación general de la fase 5 del proyecto de intercomparación Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) utilizados en las proyecciones del oleaje

Modelo	Institución	Resolución atmosférica (lat. x lon., número de capas)
ACCESS1.0	CSIRO-BOM (Australia)	1,25° x 1,9°, L38
ACCESS1.3	CSIRO-BOM (Australia)	1,25° x 1,9°, L38
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center (China)	2,8° x 2,8°, L26
BCC-CSM1.1(m)	Beijing Climate Center (China)	1,12° x 1,12°, L26
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science (China)	2,8° x 2,8°, L26
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canadá)	2,8° x 2,8°, L35
CCSM4	National Center for Atmospheric Research (Estados Unidos)	0,94° x 1,25°, L26
CESM1(BGC)	Community Earth System Model Contributors (Estados Unidos)	0,94° x 1,25°, L26
CESM1(CAM5)	Community Earth System Model Contributors (Estados Unidos)	0,94° x 1,25°, L26
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italia)	0,75° x 0,75°, L31
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italia)	1,9° x 1,9°, L95
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques (Francia)	1,4° x 1,4°, L31
CSIRO-Mk3.6.0	CSIRO-QCCCE (Australia)	1,9° x 1,9°, L18
FGOALS-g2	LASG-CESS (China)	2,8° x 2,8°, L26
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Estados Unidos)	2° x 2,5°, L48
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Estados Unidos)	2° x 2,5°, L48
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Estados Unidos)	2° x 2,5°, L48
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	1,25° x 1,9°, L60
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	1,25° x 1,9°, L38
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	1,5° x 2°, L21
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (Francia)	1,9° x 3,75°, L39
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace (Francia)	1,25° x 2,5°, L39
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace (Francia)	1,9° x 3,75°, L39
MIROC-ESM	MIROC (Japón)	2,8° x 2,8°, L80
MIROC-ESM-CHEM	MIROC (Japón)	2,8° x 2,8°, L80
MIROC5	MIROC (Japón)	1,4° x 1,4°, L40
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Alemania)	1,9° x 1,9°, L47
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie (Alemania)	1,9° x 1,9°, L95
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (Japón)	1,1° x 1,1°, L48
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre (Noruega)	1,9° x 2,5°, L26

Fuente: Elaboración propia.

2. Modelo de *downscaling* estadístico

Se utiliza un método basado en tipos de tiempo para proyectar el oleaje a partir de las presiones a nivel del mar (*sea level pressure fields*) de los distintos GCM disponibles para los escenarios de cambio climático (Camus y otros, 2014).

Los tipos de tiempo se obtienen mediante una clasificación guiada, basada en la combinación de una técnica de clasificación k-medias y una regresión multivariada previa entre el predictor y el predictando. Esta técnica de clasificación semisupervisada permite una detección de patrones de circulación atmosférica

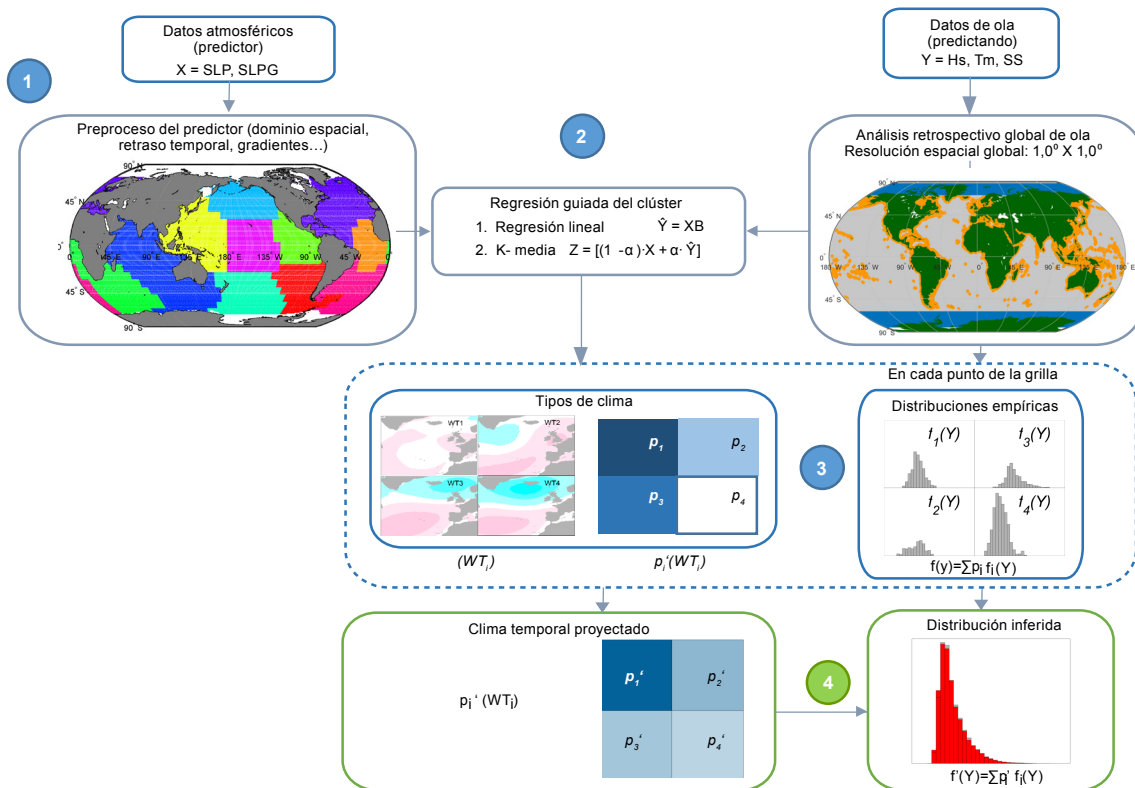
sinóptica con una mayor representatividad de las condiciones del oleaje local. El nivel de influencia de los datos del oleaje se controla mediante un factor de ponderación que establece un equilibrio entre la pérdida/ganancia de la representatividad del predictor/predictando (Cannon, 2012). Se ha implementado un factor igual a 0,6 basado en un análisis de sensibilidad de la influencia de la regresión guiada en la dispersión del clima marítimo multivariado dentro de cada tipo de tiempo y la pericia del modelo estadístico en el Atlántico Norte (Camus y otros, 2016). Se ajusta el modelo de regresión multivariada entre el predictando y el predictor (SLP y GSLP) a escala diaria. Las predicciones del predictando se calculan a partir del modelo ajustado. Se ha utilizado el modelo desarrollado a escala global (Camus y otros, 2017) para obtener las proyecciones de cambio climático en Cuba.

El esquema del modelo de *downscaling* estadístico se muestra en el gráfico 28:

- i) El océano se ha dividido en 11 subdominios con un predictor común (dominio espacial y cobertura temporal) basado en una caracterización de la génesis del oleaje a escala global.
- ii) Los datos de oleaje a una resolución de 1,0° de la base de datos GOW2 se utilizan como referencia de las observaciones históricas del predictando para establecer la relación estadística. La clasificación semiguaiada se ha aplicado a cada nodo del oleaje teniendo en cuenta como predictor el oleaje multivariado (Hs, Tp, θ).
- iii) El valor medio asociado a cada variable (Hs o Tp) se calcula para cada tipo de tiempo en cada nodo de la malla de datos del oleaje GOW2.
- iv) Las proyecciones del oleaje se determinan a partir de las probabilidades futuras de los tipos de tiempo y el valor medio de cada variable asociado a cada tipo de tiempo en cada nodo GOW2.

Gráfico 28

Esquema de la metodología de regionalización (*downscaling*) estadística para la proyección del oleaje



Fuente: Elaboración propia.

3. Definición del predictor

El predictor se define a escala diaria a partir de las variables: presiones al nivel del mar (*sea level pressure*) y los gradientes al cuadrado de SLP (GSLP). El dominio espacial y la cobertura temporal del predictor son específicos de la zona de estudio. El dominio espacial debe cubrir el área de la cuenca oceánica de generación de las olas que llegan a ese lugar en particular. Las condiciones atmosféricas históricas recientes deben incluirse en el predictor con el fin de tener en cuenta los procesos de generación y propagación de las olas que llegan a esa ubicación específica.

El proceso de definición del dominio espacial y cobertura temporal del predictor de un modelo de *downscaling* estadístico puede suponer una demanda computacional considerable. Por tanto, se hace uso de la caracterización global de la génesis del oleaje llevada a cabo por IHCantabria para la obtención de las proyecciones globales del oleaje.

Se ha aplicado el método ESTELA (Evaluating the Source and Travel-time of the wave Energy reaching a Local Area, (Pérez y otros, 2014)) para la evaluación del origen y tiempos de propagación de la energía del oleaje. Se han obtenido ESTELAS cada 5,0° a partir de información espectral. Se han aplicado diferentes filtros para eliminar zonas del área de generación no relevantes. Los mapas de las ESTELAS se han transformado a una escala de 0 a 1 (presencia/no presencia de energía del oleaje) para hacer las áreas de generación del oleaje comparables dentro de cada mapa y entre diferentes ESTELAS. Estos datos se han clasificado mediante el algoritmo K-medias, obteniéndose los 11 patrones que se muestran en el gráfico 29. Los subdominios del oleaje a escala global se definen a partir de las localizaciones con el mismo patrón, representado en el mismo color en el gráfico 29. El dominio espacial del predictor de cada subdominio abarca el patrón de generación del oleaje y las localizaciones dentro del subdominio. El tiempo que tarda la energía en propagarse en cada patrón define la historia reciente de las presiones a nivel del mar (cobertura temporal del predictor).

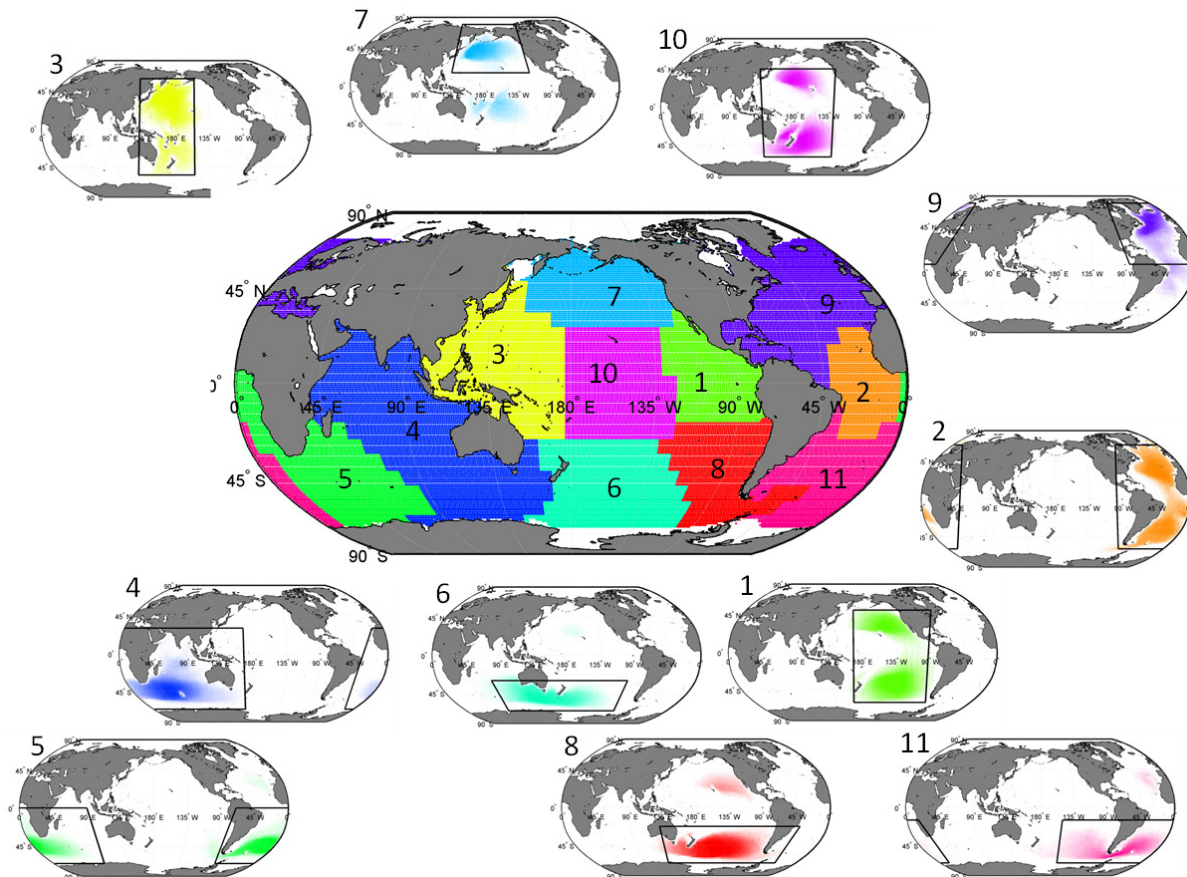
Cuba pertenece al dominio 9, que abarca el Atlántico Norte y el Mar Caribe. El dominio espacial del correspondiente predictor cubre desde altas latitudes hasta la zona del Ecuador. La cobertura temporal del predictor es de tres días, es decir, el predictor se calcula a escala diaria como la media de ese mismo día y dos días antes (en Camus y otros, 2014, se puede encontrar una descripción más detallada de la definición del predictor).

Los datos de las presiones al nivel del mar de la base de datos CFSR, utilizados para la caracterización histórica del predictor y de las proyecciones CMIP5, se convierten a una rejilla común de resolución 2,0°x2,0°. Los campos diarios de las presiones se han estandarizado para evitar resultados sesgados como consecuencia de la diferente escala de las variables (presiones y gradientes). En el caso de los datos de los GCM, la estandarización se ha aplicado utilizando la climatología media y la desviación estándar del período histórico (1997-2005) del mismo modelo, disminuyendo así también el sesgo del modelo climático.

En primer lugar, se muestran los cambios en la altura de ola a escala global para posteriormente analizar los cambios a escala regional con el objetivo de enmarcar los regionales en la dinámica global. En el gráfico 30 se muestra la media obtenida a partir de los 30 GCM de la altura de ola significativa a escala global, junto con los cambios proyectados en la media anual y la media de invierno y verano para el período 2070-2100, relativo al período histórico 1979-2005 para el escenario RCP8.5. Los cambios se consideran consistentes cuando la variación media de la media multimodelo supera la desviación estándar intermodelo y más del 80% de los GCM coinciden en el signo del cambio. Los incrementos esperados de la altura de ola se limitan a las latitudes altas del hemisferio sur y al este del Pacífico Tropical. La magnitud de estos cambios es del orden de 0,06-0,09 m en el Pacífico Tropical, mientras que estos cambios llegan a los 0,3 m en el Océano Sur. Estos cambios son debidos a un fortalecimiento de los vientos del oeste en el hemisferio sur que produce un incremento de los mares de fondo (*swell*) en las altas latitudes de este hemisferio (Hemer, Katzfey y Trenham, 2013). Por el contrario, se esperan disminuciones de la altura de ola media anual en las latitudes medias del Atlántico Norte, Pacífico Norte y en las latitudes medias del

hemisferio norte, que pueden ser atribuidas a un desplazamiento de las tormentas extratropicales hacia los polos (Chang y otros, 2012). La magnitud de estos cambios es del orden de 0,06-0,09 m. Con respecto a los cambios en la zona de Cuba, en el gráfico 32 se puede observar cómo la disminución de la altura de ola esperada es del orden de 0,03 m, sin que haya consistencia entre los modelos. La disminución de la altura de ola se refuerza en el invierno (panel izquierdo del gráfico 32) hasta valores medios de cambio consistentes de 0,9 m en la costa sur de la isla. En el verano (panel derecho del gráfico 32) se espera una tendencia a aumentos de la altura de ola de magnitud del orden de 0,03 m sin consenso entre modelos.

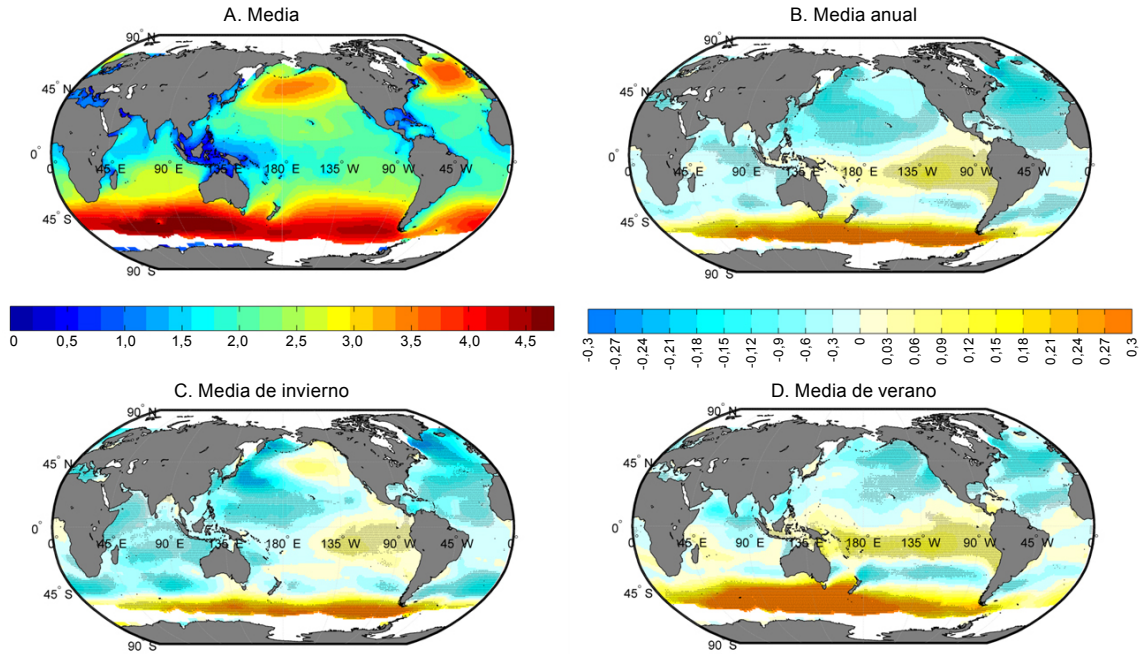
Gráfico 29
Subdominios del oleaje a escala global sobre la base de los 11 patrones del área de generación del oleaje



Fuente: P. Camus y otros, “Statistical wave climate projections for coastal impact assessments”, *Earth’s Future*, vol. 5, N° 9, 2017.

Nota: Los subdominios se han representado en el mismo color que el patrón correspondiente. El dominio espacial del predictor se ha marcado con un recuadro negro en cada patrón de generación del oleaje.

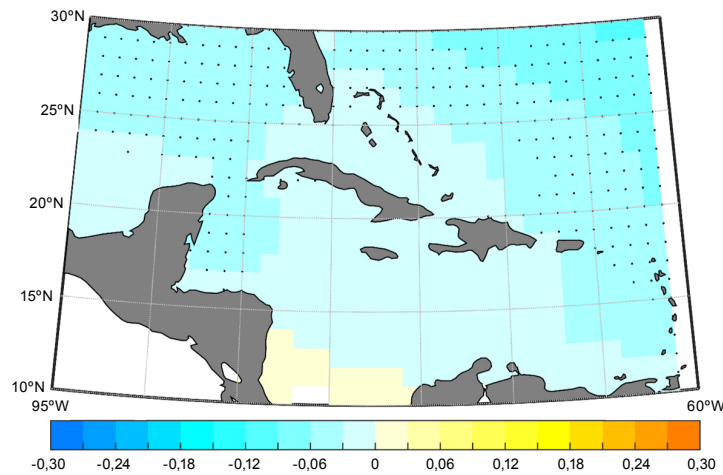
Gráfico 30
Altura de ola significativa (Hs) media a escala global y cambios proyectados en la media anual y la media de invierno y verano entre 1979-2005 y 2070-2099



Fuente: P. Camus y otros, “Statistical wave climate projections for coastal impact assessments”, *Earth’s Future*, vol. 5, N° 9, 2017.

Nota: En el subgráfico A se muestra la altura de ola significativa media obtenida a partir del conjunto de los 30 GCM para el período de tiempo 1979-2005. En los subgráficos B, C y D se muestran proyecciones multimodelo de la media anual, de invierno (EFM) y de verano (AMJ) para el periodo futuro 2070-2100 con relación al período de referencia (1979-2005) para el escenario RCP8.5. Las áreas sombreadas indican aquellas zonas en las que la magnitud de la media del multimodelo supera la desviación estándar entre modelos.

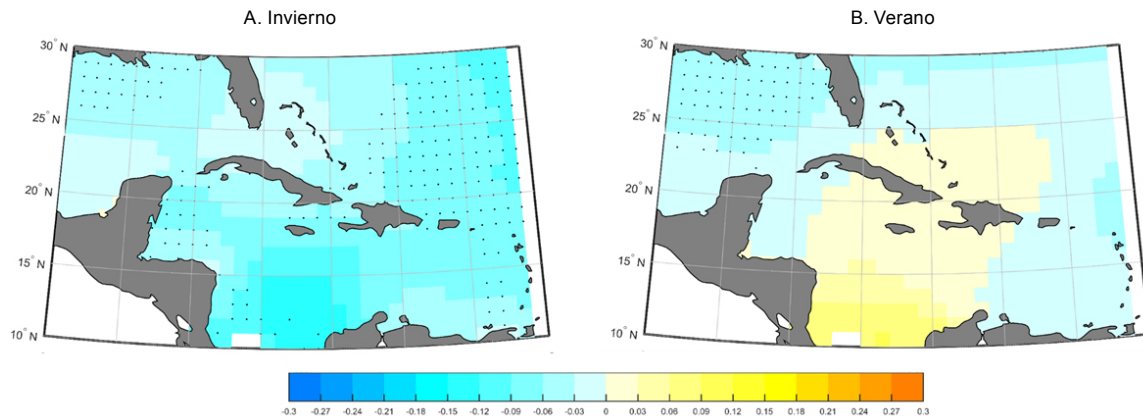
Gráfico 31
Cambio de altura de ola significativa (Hs) media en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099
(En metros)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cambio de la altura de ola significativa media obtenida a partir del conjunto de los 30 GCM entre el período de referencia (1979-2005) y el período 2070-2099, para el escenario RCP8.5. Las áreas sombreadas indican que más del 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

Gráfico 32
Cambios estacionales en invierno y verano de la altura de ola significativa (Hs) media
en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099
(En metros)

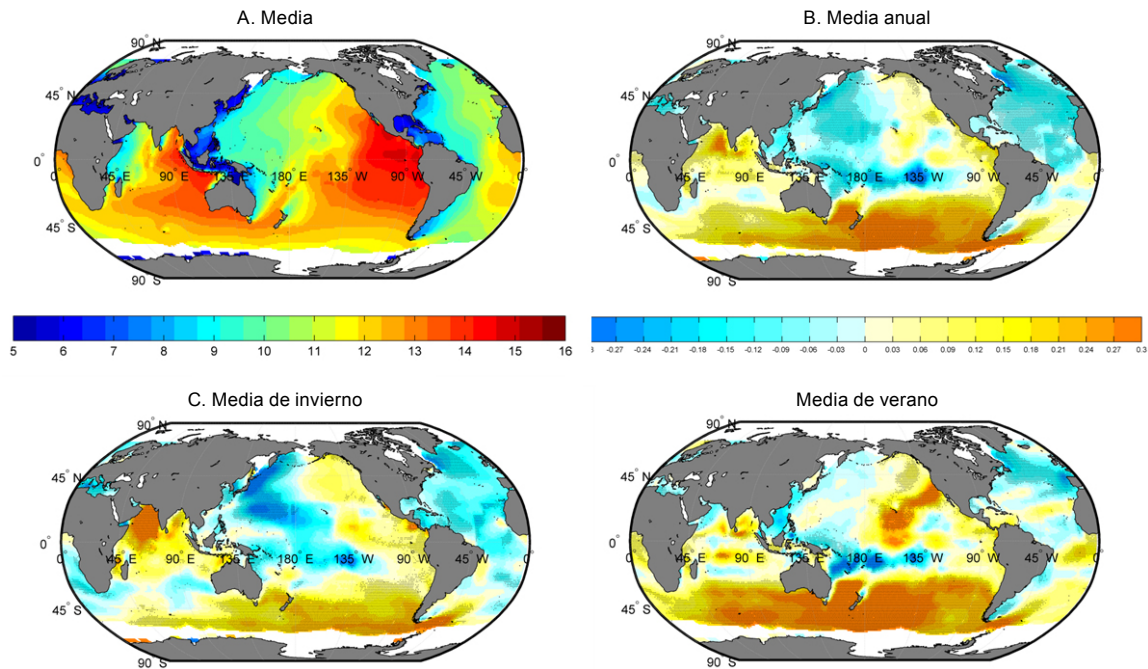


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cambio de la altura de ola significativa media entre el período de referencia (1979-2005) y el período 2070-2099 para el escenario RCP8.5. Las áreas sin sombreado indican que más del 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

El gráfico 33 muestra los cambios proyectados a escala global del valor anual y estacional (invierno, verano) del período de pico T_p en el período 2070-2100 relativo al período 1979-2005 para el escenario RCP8.5 del conjunto de los 30 GCM considerados. Se puede observar cómo las áreas en las que se espera un aumento del período de pico son más extensas que en el caso de la altura de ola debido a que los *swells* generados a gran distancia tienen un mayor efecto diferido en el período de pico mientras que los cambios en la altura de ola están más directamente relacionados con los cambios en los vientos. El aumento en la intensidad de los vientos del oeste en el hemisferio sur se refleja en una intensificación de los períodos hasta las proximidades del Ecuador. Los valores máximos del incremento del período de pico son del orden de 0,3 segundos en el sur del Pacífico. En cuanto a la disminución del período de pico, los máximos valores esperables son del orden de 0,3 segundos en el oeste del Pacífico Norte durante los meses de invierno. En el Atlántico Norte, se estiman unos descensos del orden de los 0,09 segundos en los valores medios y mensuales. Los cambios en el período de pico en la zona de Cuba se muestran en el gráfico 34. Se esperan disminuciones máximas del orden de los 0,06 segundos en los extremos norte de la isla sin consistencia en el signo del cambio entre los modelos y con una magnitud inferior a la desviación entre los modelos. Con respecto a la estacionalidad (véase el gráfico 35), la disminución del período de pico durante el invierno se intensifica, llegando a cambios consistentes del orden de 0,09 segundos en el sur de la isla. Durante el verano, se espera un ligero aumento de los períodos de pico en el sur de la isla, con cambios del orden de 0,02 segundos.

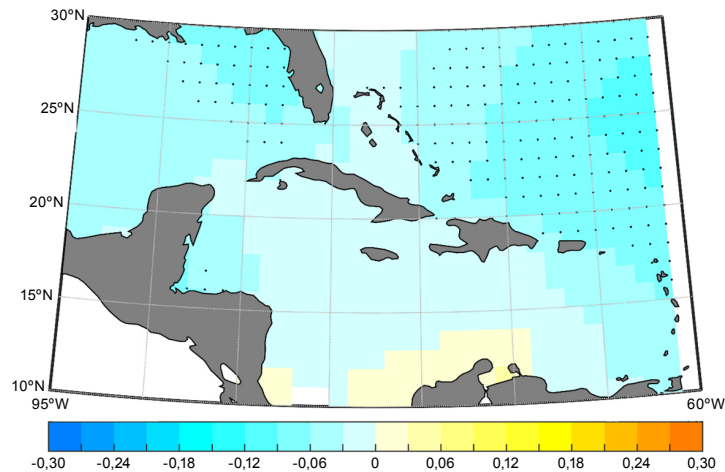
Gráfico 33
Cambios proyectados a escala global del valor anual y estacional del período de pico (Tp)
del oleaje entre 1979-2005 y 2070-2099
(En segundos)



Fuente: P. Camus y otros, “Statistical wave climate projections for coastal impact assessments”, *Earth’s Future*, vol. 5, N° 9, 2017.

Nota: En el subgráfico A se muestra el período de pico medio obtenido a partir del conjunto de los 30 GCM para el período 1979-2005. En los subgráficos B, C y D se muestran proyecciones multimodelo de la media anual, de invierno (EFM) y de verano (AMJ) para el período futuro 2070-2100 con relación al período de referencia (1979-2005), para el escenario RCP8.5. Las áreas sombreadas indican aquellas zonas en las que la magnitud de la media del multimodelo supera la desviación estándar entre modelos.

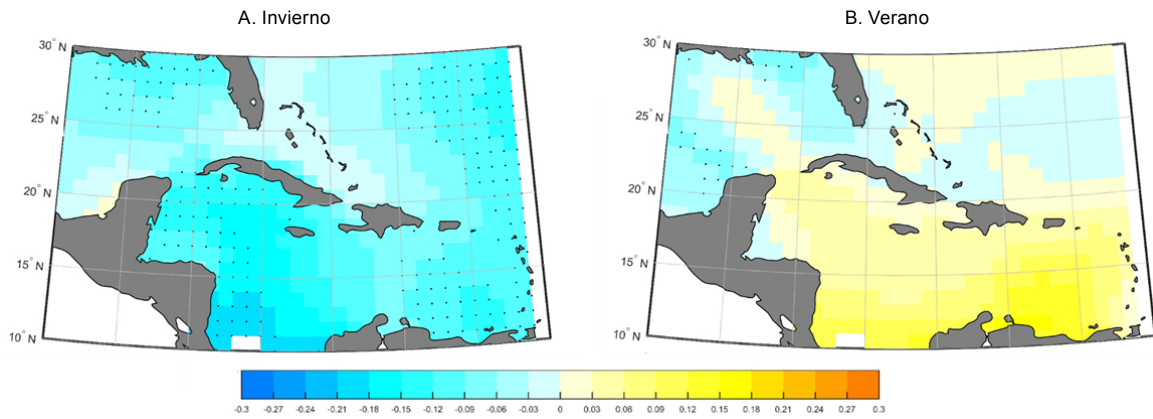
Gráfico 34
Cambio del período de pico (Tp) medio del oleaje en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099
(En segundos)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cambio del período de pico medio obtenido a partir del conjunto de los 30 GCM entre el período de referencia (1979-2005) y el período 2070-2099, para el escenario RCP8.5 Las áreas sin sombreado indican que más del 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

Gráfico 35
Cambios estacionales en invierno y verano del período de pico (T_p) medio del oleaje
en la zona de Cuba entre 1979-2005 y 2070-2099
(En segundos)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Cambio del período de pico medio del oleaje entre el período de referencia (1979-2005) y el período 2070-2099 para el escenario RCP8.5. Las áreas sin sombreado indican que más del 80% de los modelos coinciden en el signo del cambio.

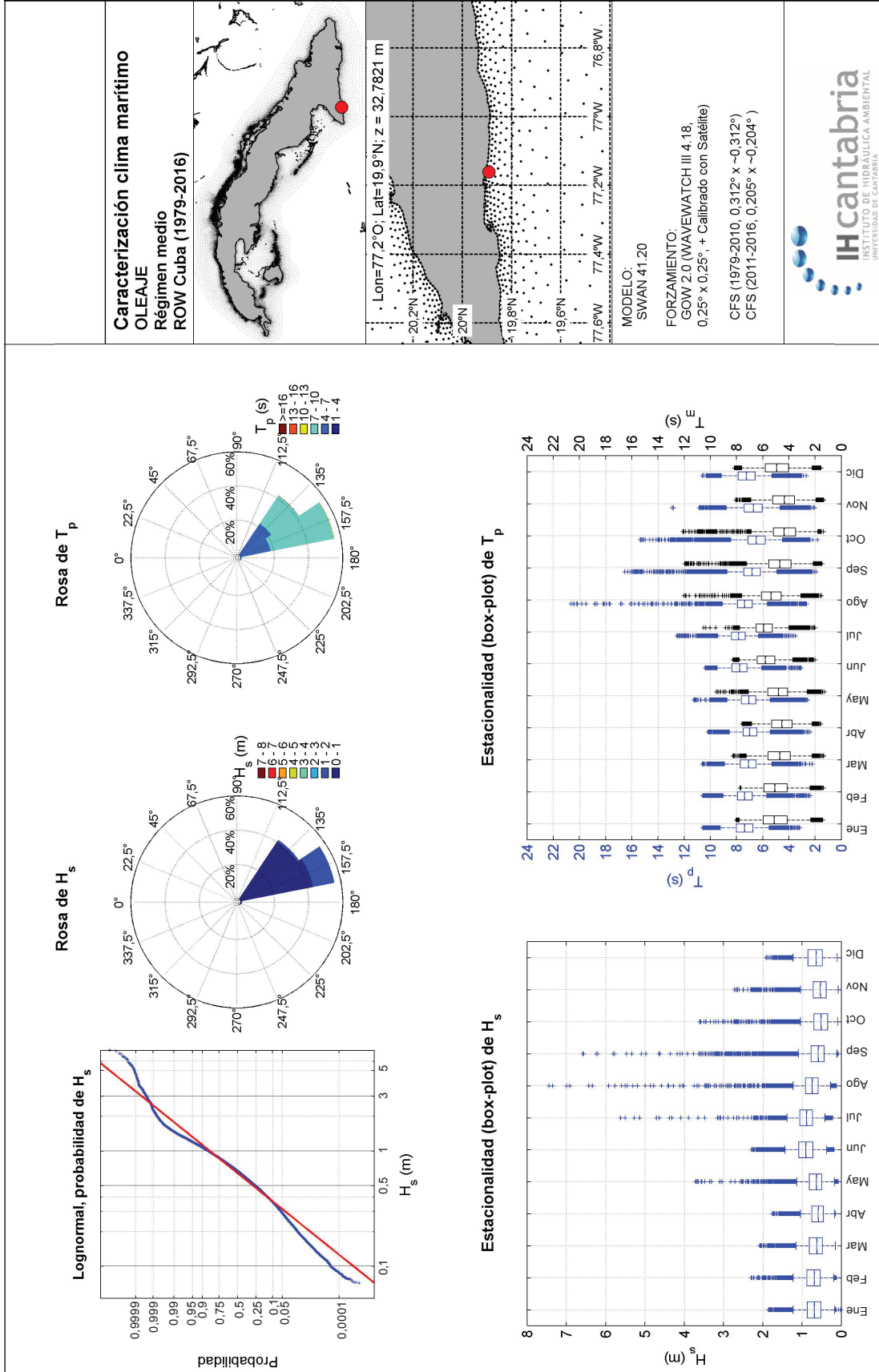
Bibliografía

- Amante, C. y B. W. Eakins (2009), "ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis", *NOAA Technical Memorandum NESDIS*, NGDC-24, Asheville, Centro Nacional de Datos Geofísicos, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).
- Ardhuin, F. y otros (2010), "Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: definition, calibration, and validation", *Journal of Physical Oceanography*, vol. 40, N° 9.
- Booij, N., R. C. Ris y L. Holthuijsen (1999), "A third-generation wave model for coastal regions. Part I: model description and validation", *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, N° C4.
- Camus, P. y otros (2017), "Statistical wave climate projections for coastal impact assessments", *Earth's Future*, vol. 5, N° 9.
- _____ (2016), "An atmospheric-to-marine synoptic classification for statistical downscaling marine climate", *Ocean Dynamics*, vol. 66, N° 1.
- _____ (2014), "A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate", *Journal of Geophysical Research*, vol. 119, N° 11.
- Cannon, A. J. (2012), "Regression-guided clustering: a semisupervised method for circulation-to-environment synoptic classification", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 51, N° 2.
- Chang, E. K. M., Y. Guo y X. Xia (2012), "CMIP5 multimodel ensemble projection of storm track change under global warming", *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, N° D23.
- Egbert, G. D., A. F. Bennett y M. G. Foreman (1994), "TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model", *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, N° C12.
- Egbert G. D. y S. Y. Erofeeva (2002), "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, N° 2.
- Erikson, L. H. y otros (2015), "Projected wave conditions in the Eastern North Pacific under the influence of two CMIP5 climate scenarios", *Ocean Modelling*, vol. 96, parte 1.
- Gerling, T. W. (1992), "Partitioning sequences and arrays of directional ocean wave spectra into component wave systems", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 9, N° 4.
- Hanson, J. L. y O. M. Phillips (2001), "Automated analysis of ocean surface directional wave spectra", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 18, N° 2.
- Hemer, M. A., J. Katzfey y C. E. Trenham (2013), "Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario", *Ocean Modelling*, vol. 70.
- IMARS-USF (Institute for Marine Remote Sensing- University of South Florida) (2005), "Millennium Coral Reef Mapping Project: unvalidated maps. These maps are unendorsed by IRD, but were further interpreted by UNEP World Conservation Monitoring Centre", Cambridge, Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación (CMVC) [en línea] <http://data.unep-wcmc.org/datasets/1>.

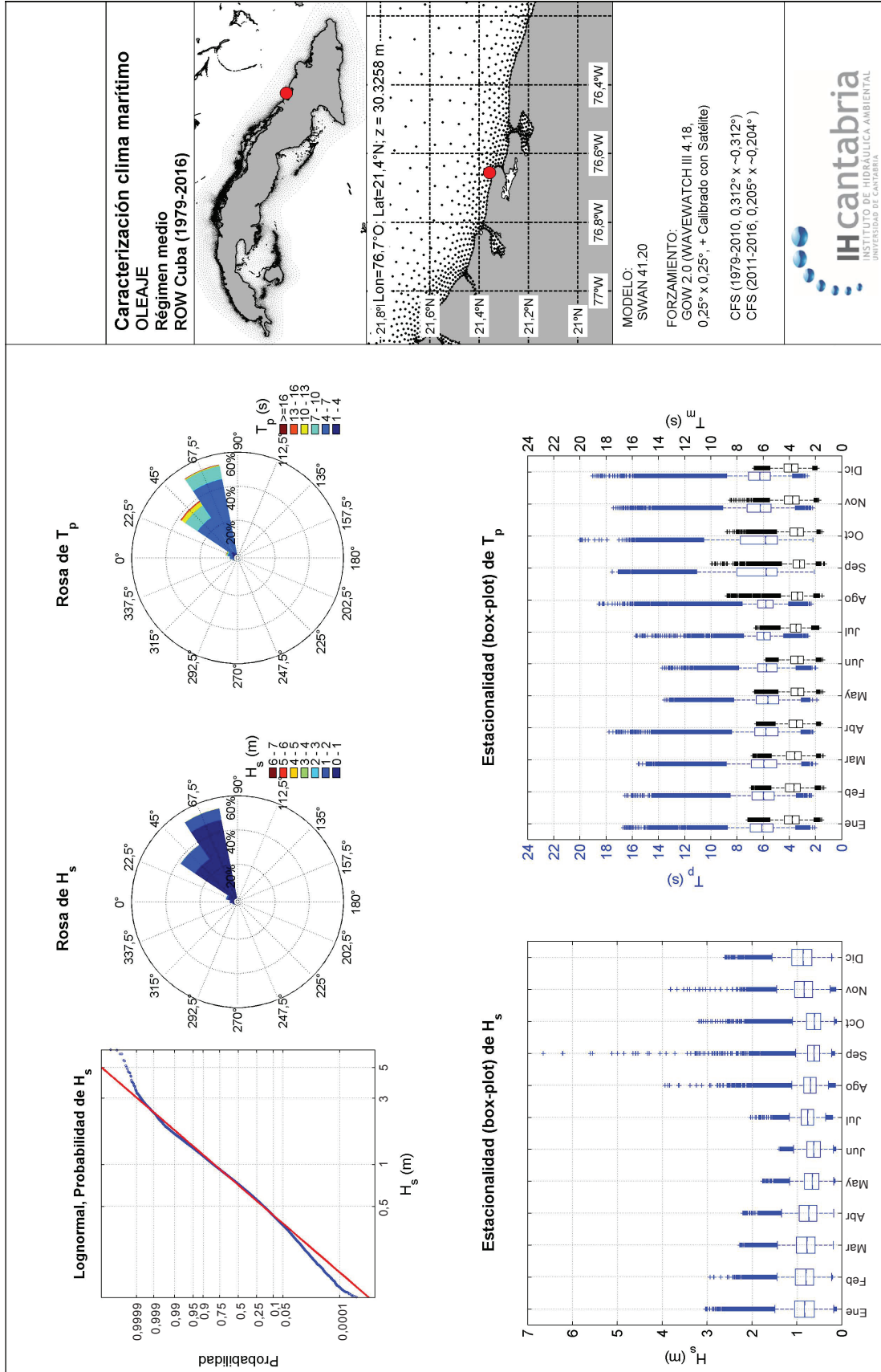
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press.
- Jonsson, I. G. (1967), “Wave boundary layers and friction factors”, *Proceedings of the 10th International Conference on Coastal Engineering*, Tokio, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Madsen, O. (1988), “Spectral wave attenuation by bottom friction: theory”, *Proceedings of the 21st International Conference on Coastal Engineering*, Tokio, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Méndez, F. J., y otros (2006), “Estimation of the long-term variability of extreme significant wave height using a time-dependent Peak Over Threshold (POT) model”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 111.
- Mínguez, R. y otros (2011), “Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 28, N° 11.
- Mori, N. y otros (2010), “Projection of extreme wave climate change under global warming”, *Hydrological Research Letters*, vol. 4, N° 15.
- Moss, R.H. y otros (2010), “The next generation of scenarios for climate change research and assessment”, *Nature*, vol. 463.
- Pérez, J., M., Menéndez y I.J. Losada (2017), “GOW2: A global wave hindcast for coastal applications”, *Coastal Engineering*, vol. 124.
- Pérez, J., y otros (2014), “ESTELA: A method for evaluating the source and travel-time of the wave energy reaching a local area”, *Ocean Dynamics*, vol. 64, N° 8.
- Queffelec P., F. Ardhuin y J.-M. Lefèvre (2011), “Wave height measurements from altimeters: validation status and applications” [en línea] http://globwave.ifremer.fr/download/12_PierreQueffelec_Altimeter_Wave_Height_Measurements.pdf.
- Saha, S. y otros (2014), “The NCEP Climate Forecast System Version 2”, *Journal of Climate*, vol. 27.
- _____ (2010), “The NCEP Climate Forecast System Reanalysis”, *American Meteorological Society*, vol. 91.
- Schiller, A. y G. B. Brassington (2011), *Operational Oceanography in the 21st Century*, Berlín, Springer.
- Semedo, A. y otros (2013), “Projection of global wave climate change toward the end of the Twenty-First Century”, *Journal of Climate*, vol. 26.
- Sheppard, C. y otros (2005), “Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles”, *Estuarine, Coast and Shelf Science*, vol. 64.
- Spalding, M.D., C. Ravilious y E.P. Green (2001), *World Atlas of Coral Reefs*, Berkeley, The University of California Press.
- Thibaut, P. y S. Labroune (2007), “Evaluation of the ground retracking algorithms on Jason-1 data”, document presentado en la reunión “Ocean Surface Topography Science Meeting (OSTST)”.
- Tolman, H. L. (2014), “User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB”, *Technical Note*, N° 316.
- Wang, X. L., V. R. Swail y A. Cox (2010), “Dynamical versus statistical downscaling methods for ocean wave heights”, *International Journal of Climatology*, vol. 30, N° 3.
- Wessel, P. y W. Smith (1996), “A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, N° B4.
- Zijlema, M., G. Ph. van Vledder y L.H. Holthuijsen (2012), “Bottom friction and wind drag for spectral wave models”, *Coastal Engineering*, vol. 65.

Anexo

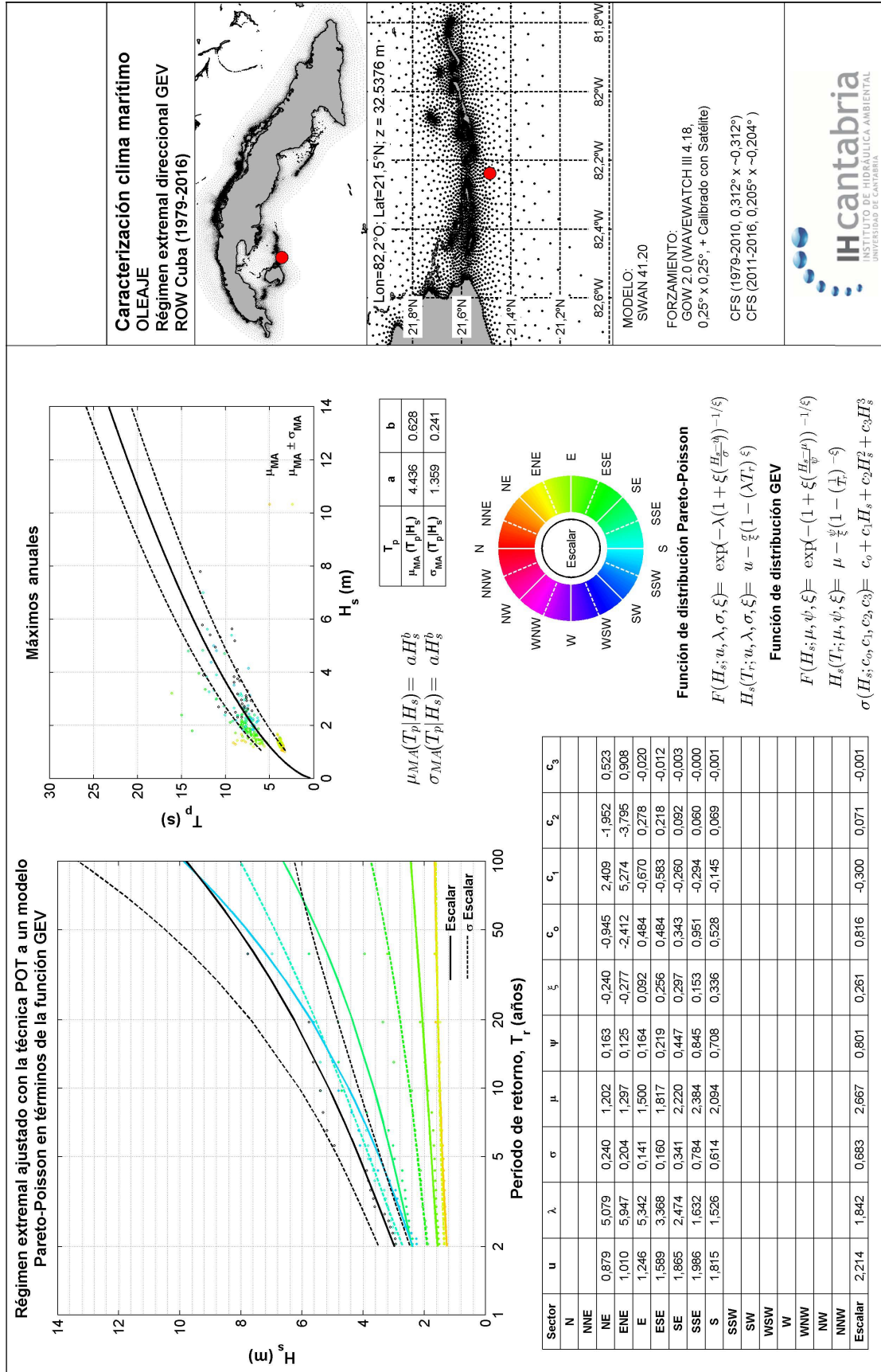
Ejemplo 1 de ficha del régimen medio de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba



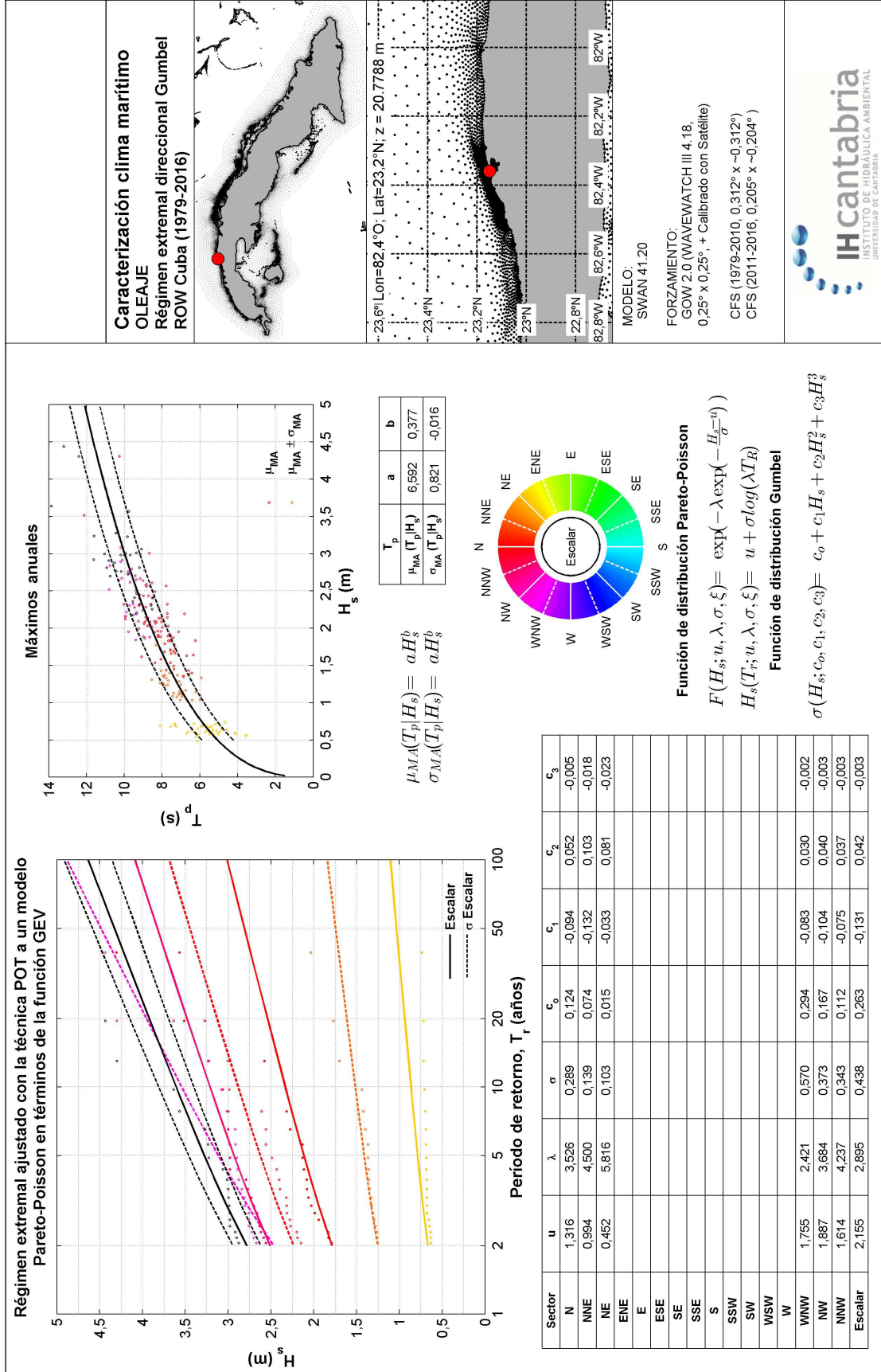
Ejemplo 2 de ficha del régimen medio de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba

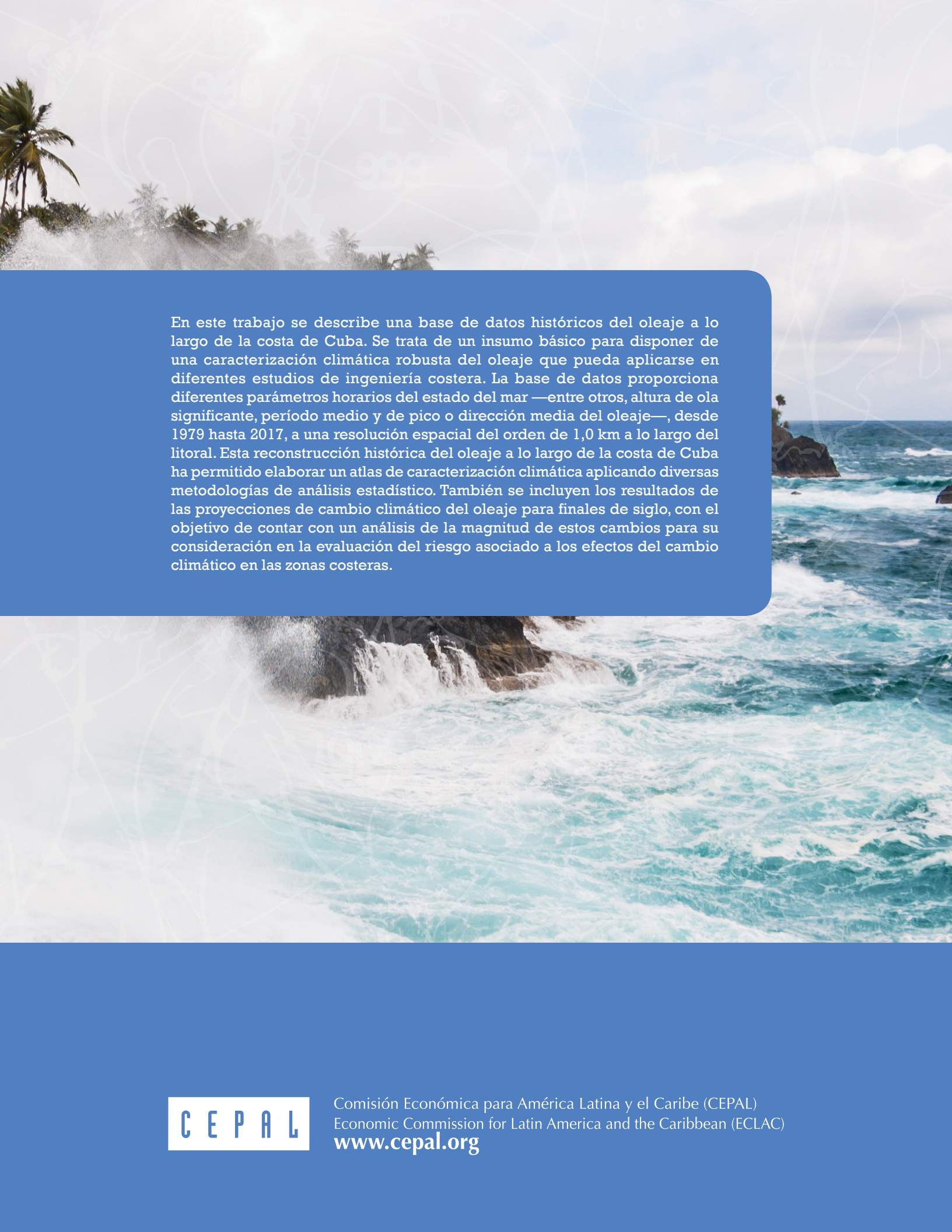


Ejemplo 1 de ficha del régimen extremo (POT-GEV) de oleaje para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba



Ejemplo 1 de ficha del régimen extremo (POT-Gumbel) para la caracterización del clima a lo largo de la costa de Cuba





En este trabajo se describe una base de datos históricos del oleaje a lo largo de la costa de Cuba. Se trata de un insumo básico para disponer de una caracterización climática robusta del oleaje que pueda aplicarse en diferentes estudios de ingeniería costera. La base de datos proporciona diferentes parámetros horarios del estado del mar —entre otros, altura de ola significativa, período medio y de pico o dirección media del oleaje—, desde 1979 hasta 2017, a una resolución espacial del orden de 1,0 km a lo largo del litoral. Esta reconstrucción histórica del oleaje a lo largo de la costa de Cuba ha permitido elaborar un atlas de caracterización climática aplicando diversas metodologías de análisis estadístico. También se incluyen los resultados de las proyecciones de cambio climático del oleaje para finales de siglo, con el objetivo de contar con un análisis de la magnitud de estos cambios para su consideración en la evaluación del riesgo asociado a los efectos del cambio climático en las zonas costeras.