



Variabilidad espacial y temporal de la altura de ola significativa en las costas del Caribe colombiano durante el año 2020 y 2021.

Valentina Michelle Martínez Atencio

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafo

Asesor

Vladimir G. Toro Valencia, Doctor (PhD) en Oceanografía Física

Coasesores

Claudia P. Urbano Latorre, Investigador en Dinámica Marina CIOH

Juan G. Torres Córdoba, Ingeniero Oceanográfico

Universidad de Antioquia

Corporación Académica Ambiental

Oceanografía

Turbo, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Martínez Atencio, 2024)
Referencia	Martínez Atencio, V. M. (2024). <i>Variabilidad espacial y temporal de la altura de ola significativa en la cuenca del Caribe colombiano durante el año 2020 y 2021</i> .
Estilo APA 7 (2020)	[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



Grupo de Investigación Sistemas Marinos y Costeros (GISMAC).

Corporación Académica Ambiental (CAA).

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe: Claudia P. Urbano., Stephanie Gonzales., & Diana P. Herrera.



Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre.

A mi fiel Coco.

Familia Atencio Valiente & Cardona Pájaro.

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios por permitirme cumplir mi sueño de pequeña y poder culminar de manera satisfactoria este gran paso, logrando vencer cada uno de los obstáculos que se presentaron durante este camino.

A mi madre, agradecerle por estar presente en cada etapa, por superar cada sacrificio, por mantenerme en pie estos 23 años, por cumplir ambos roles en mi vida y por jamás permitir que me faltara nada. Eres mi motor y mis ganas de salir adelante siempre.

A mi familia Atencio Valiente por siempre alentarme y acompañarme desde la distancia y a la familia Cardona Pájaro por tanto momentos especiales y únicos en su amado Necoclí, gracias por tanto amor, apoyo incondicional y hacerme querer tanto a Neco.

A todas las personas que me recibieron con las puertas abiertas de su casa y corazón, en especial a Luisa Ospina, Joan Barrios por no abandonarme en esta etapa lejos de mi familia y amigos, por su acompañamiento constante y por las risas en medio de tantas lágrimas.

Al profe Leno, por tantas risas en el aula de clases en el cual aprendimos muchísimo. Eres el mejor de todos, jamás olvidaré las salidas de campo, gran manera para poner a prueba nuestros conocimientos y contigo eran exenciónales. A mi director de tesis Vladimir Toro y asesor Juan G. Torres por el acompañamiento, dedicación y apoyo constante en toda mi carrera profesional y trabajo de grado. A mi asesora Claudia P. Urbano por aportar su conocimiento y tiempo en las instalaciones del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, gracias a todos ellos por el apoyo a culminar esta etapa importante en mi vida, por el crecimiento personal y profesional que inculcaron en mí.

A todas las personas que se cruzaron en mi camino durante esta etapa en la sede Ciencias del Mar, en las mesas, donde compartíamos nuestro conocimiento y muchas experiencias de la vida. Espero nos encontremos pronto ejerciendo y cumpliendo todos nuestros grandes sueños.

Tabla de contenido

Glosario	10
Siglas, acrónimos y abreviaturas	12
Resumen	14
Abstract	15
1. Introducción	16
2. Marco Teórico.....	20
3. Objetivos	25
3.1 Objetivo general	25
3.2 Objetivos específicos.....	25
4. Área de Estudio y Metodología	26
4.1 Área de estudio.....	26
4.2 Métodos	27
4.2.1 Vientos superficiales	27
4.2.2 Ciclones tropicales	28
4.2.3 Parámetros integrales del oleaje.....	30
4.2.3.1 Boyas NOAA (NDBC).	30
4.2.3.2 Modelo numérico MFWAN.....	30
5. Resultados y Discusión	32
5.1 Delimitación de las épocas.....	32
5.2 Comparación de los datos del modelo numérico con datos <i>in situ</i>	34
5.3 Análisis de los parámetros integrales de oleaje (altura de ola significativa).....	35
6. Conclusiones	43
7. Recomendaciones y Trabajo a Futuro.....	44
8. Referencias.....	45

9. Anexos51

Lista de tablas

Tabla 1. Escala de vientos huracanados Saffir-Simpson.....	21
Tabla 2. Datos disponibles en el reanálisis ERA5.....	23
Tabla 3. Datos disponibles de las estaciones meteorológicas 14015080 y 15065180 a cargo del IDEAM.....	24
Tabla 4. Información de vientos superficiales analizados.....	28
Tabla 5. Ciclones tropicales presentados en el océano Atlántico durante el año 2020. Los ciclones tropicales resaltados hacen referencia a aquellos que ingresaron en la cuenca Colombia. Información tomada del NHC.....	29
Tabla 6. Información de las boyas en el mar Caribe a cargo de la NOAA.	30
Tabla 7. Límites de las épocas de análisis del oleaje.	34

Lista de figuras

Figura 1. Características de una ola. Modificado de Pinet (2019).	20
Figura 2. Mapa del área de estudio.	26
Figura 3. Ubicación espacial de los sitios donde se seleccionaron los datos de los parámetros integrales del modelo MFWAN.	31
Figura 4. Límites de las épocas de vientos débiles y vientos fuertes/alisios. La primera línea discontinua indica el final de la época de vientos débiles y la segunda el inicio de los vientos fuertes/alisios.	32
Figura 5. Comparación de los datos de altura de ola significativa del modelo MFWAN y los datos medidos in situ por las boyas a cargo de la NOAA.	34
Figura 6. Diagrama tipo Howmöller para valores de altura de ola significativa a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).	36
Figura 7. Serie temporal de la altura de ola significativa para cada uno de los sitios de interés. Las líneas verticales de color negro delimitan las épocas de oleaje poco energético (eOPE), ciclones tropicales (eCT) y vientos alisios (eVA).	37
Figura 8. Variación de la altura de ola significativa durante la eOPE (abril a junio).	38
Figura 9. Variación de la altura de ola significativa durante la eCT (julio a noviembre). Las líneas verticales discontinuas indican la fecha del tránsito y/o formación de los ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano.	39
Figura 10. Variación de la altura de ola significativa en los lugares seleccionados sobre la línea de costa del Caribe colombiano durante el tránsito y formación de los ciclones tropicales que ingresaron al Caribe colombiano: Marco, Eta e Iota.	40
Figura 11. Variación de T_p durante la eCT (julio a noviembre). Las líneas verticales discontinuas color rojo indican la fecha del tránsito y/o formación de los ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano, y las líneas discontinuas color negro indican los ciclones que se presentaron por fuera de la cuenca.	41
Figura 12. Variación de la altura de ola significativa en la eVA (diciembre a marzo).	42

Lista de anexos

Anexo 1. Trayectoria de los ciclones Marco, Eta e Iota.	51
Anexo 2. Ubicación de las boyas de la NOAA en el mar Caribe.	51
Anexo 3. Diagrama tipo Howmöller para el periodo del oleaje a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).	52
Anexo 4. Diagrama tipo Howmöller para la dirección del oleaje a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).	53
Anexo 5. Trayectoria de los ciclones Teddy y Épsilon.....	54

Glosario

ALTURA DE OLA: es la medida de la distancia vertical entre la cresta y el valle de una ola (MetEd, 2023).

ALTURA SIGNIFICANTE DEL OLEAJE: es la media del tercio más alto (33%) de las olas (medidas desde la depresión hasta la cresta) que se producen en un periodo determinado (NWS, 2009). Es la integral de la energía del espectro direccional del oleaje.

BOYA OCEANOGRÁFICA: objeto flotante fondeada en determinado lugar para la captación y emisión de datos de oleaje (DIMAR, 2023).

CICLÓN TROPICAL: perturbación atmosférica sobre el océano de núcleo cálido a escala sinóptica, originado sobre aguas tropicales o subtropicales, con convección profunda en torno a un centro bien definido. Una vez formado, un ciclón tropical se mantiene gracias a la extracción de energía térmica del océano a alta temperatura y a la exportación de calor a las bajas temperaturas de la troposfera superior (NHC, 2023).

DATOS *IN SITU*: son mediciones registradas en el lugar.

DIRECCION DEL OLEAJE: es la dirección desde la que se propaga el oleaje (NWS, 2009).

HURACÁN O TIFÓN: ciclón tropical en el que el viento máximo sostenido en superficie es igual o superior a 64 nudos (119 km/h o 74 mph). El término huracán se utiliza para los ciclones tropicales del hemisferio norte al este de la línea internacional de cambio de fecha hasta el meridiano de Greenwich y el término tifón se utiliza para los ciclones tropicales del Pacífico al norte del Ecuador y al oeste de la línea internacional de cambio de fecha (NHC, 2023).

LINEA DE COSTA: es la línea de superficie de la tierra que define el límite entre el continente y el mar (MetEd, 2023).

MODELO NUMÉRICO DE OLEAJE: modelo numérico de olas oceánicas que incluye ecuaciones de crecimiento, propagación y disipación de las olas para pronosticar su estado futuro en un área determinada (MetEd, 2023).

OLEAJE: perturbaciones sobre la superficie del mar generadas por el viento que se han desplazado fuera de su zona de generación. Se caracterizan por tener crestas más suaves, regulares y uniformes, y su periodo más largo que las olas de viento (NWS, 2009).

OLEAJE TIPO SWELL O MAR DE FONDO: es el oleaje que abandona el área de generación y se propaga a través de superficies marítimas sin estar sometido a la acción significativa del viento, y por tanto atenuándose progresivamente hasta su completa extinción (MetEd, 2023).

PERIODO DE LA OLA: intervalo entre el paso de crestas o valles de las olas sucesivos por un punto fijo (MetEd, 2023).

TSM: temperatura de la superficie del mar (MetEd, 2023).

VIENTOS ALISIOS: sistema de vientos relativamente constantes en dirección y velocidad que soplan en ambos hemisferios, desde los 30° de latitud hacia el Ecuador con dirección noreste en el hemisferio norte y sureste en el hemisferio sur (EcuRed, 2019).

Siglas, acrónimos y abreviaturas

BRQ	Barranquilla
CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
CTG	Cartagena
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DIMAR	Dirección General Marítima y Portuaria
Dir	Dirección de la ola
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
eCT	Época de Ciclones Tropicales
ENSO	El niño-Southern Oscillation
eOPE	Época de Oleaje Poco Energético
ERA5	Quinta generación del ECMWF
eVA	Época de Vientos Alisios
G	La Guajira
GM	Golfo de Morrosquillo
GU	Golfo de Urabá
Hs	Altura de ola significativa
HU	Huracán
HURDAT	North American Hurricane Database
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
MFWAN	Meteo France Wave Model
NDBC	National Data Buoy Center
NHC	National Hurricane Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RIO	Riohacha
S	Sapzurro
SAI	Isla de San Andrés
SM	Santa Marta
TD	Depresión Tropical
TS	Tormenta Tropical

TSM	Temperatura Superficial del Mar
Tp	Periodo pico espectral
UNGR	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres
VHM0	Altura de ola significativa (Copernicus)
VMDR	Dirección del oleaje (Copernicus)
VTPK	Periodo pico espectral (Copernicus)
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Resumen

La variación temporal de la altura de ola significativa (Hs) en las costas del Caribe colombiano no es uniforme, debido a las características espaciales de los eventos intra-anales que suceden en esta área. En general, los valores espaciales de Hs a lo largo del litoral provienen de resultados de modelos numéricos, por el escaso número de boyas en el Caribe colombiano. Es de notar la importancia e interés de la distribución espacial y temporal de la Hs con el fin de planificar, construir y crear infraestructuras costeras, dar seguimiento a rutas marítimas, control y apoyo a la gestión de flotas pesqueras y generación de bases de datos históricos. Por estas razones y con el fin de avanzar en el entendimiento de los procesos físicos relacionados con la Hs, en este trabajo se analizó información espacial y temporal procedente de la base de datos Copernicus Marine Service (Meteo France Wave Model - MFWAN) para el periodo de 2020 y 2021. Para definir las épocas de análisis se examinaron datos de la velocidad del viento de la base de datos ERA 5 (modelo ECMWF), estaciones meteorológicas del IDEAM, boletines mensuales del CIOH y la base de datos de HURDAT de la NHC. Con base a lo anterior se definieron tres épocas: (i) oleaje poco energético (abril a junio), (ii) ciclones tropicales (julio a noviembre) y (iii) vientos alisios (diciembre a marzo). Para comparar los resultados del modelo MFWAN con valores de tres boyas de la NOAA (42057, 42058 Y 42059) que se encuentran en el mar Caribe. Los resultados sugieren que los datos del modelo y de las boyas son similares con valores del coeficiente de correlación lineal R^2 de 0.9. Teniendo en cuenta lo anterior se usaron los datos de Hs cercanos a la franja litoral costera del Caribe colombiano. En este sentido los resultados muestran que los valores de Hs son mayores en la época de vientos alisios entre la ciudad de Cartagena y Santa Marta (~3.5 m). Sin embargo, el mayor valor de Hs en el periodo analizado (5 m) se presentó en la Isla de San Andrés a causa del tránsito del huracán Iota. De manera general los valores de Hs en el litoral no se ven fuertemente influenciados por el paso de ciclones tropicales, sin embargo, modifica de manera importante el periodo de las olas (T_p), llegando a valores entre 15 y 18s (huracanes Teddy y Épsilon). Esto sugiere que en la zona costera del Caribe colombiano se pueden detectar señales de ciclones tropicales lejanos en los valores de T_p . Generalmente, los mayores valores promedio de Hs de presentan en el periodo de vientos alisios, aunque los valores máximos correspondan a la época de ciclones tropicales. Siendo la época de oleaje poco energético la que presenta los menores valores.

Palabras clave: altura significativa, Caribe colombiano, alisios, ciclones tropicales.

Abstract

The temporal variation of the significant wave height (Hs) on the coasts of the Colombian Caribbean is not uniform, due to the spatial characteristics of the intra-annual events that occur in this area. In general, the spatial values of Hs along the coast come from results of numerical models, due to the small number of buoys in the Colombian Caribbean. It is worth noting the importance and interest of the spatial and temporal distribution of the Hs in order to plan, build and create coastal infrastructures, monitor maritime routes, control and support the management of fishing fleets and generate historical databases. For these reasons and in order to advance the understanding of the physical processes related to Hs, this work analyzed spatial and temporal information from the Copernicus Marine Service database (Meteo France Wave Model - MFWAN) for the period 2020 and 2021. To define the analysis periods, wind speed data from the ERA5 database (ECMWF model), IDEAM meteorological stations, CIOH monthly bulletins and the NHC HURDAT database were analyzed. Based on the above, three periods were defined: (i) low-energy waves (April to June), (ii) tropical cyclones (July to November) and (iii) trade winds (December to March). To compare the results of the MFWAN model with values from three NOAA buoys (42057, 42058 and 42059) located in the Caribbean Sea. The results suggest that the model and buoy data are similar with linear correlation coefficient R^2 values of 0.92. Taking the above into account, Hs data close to the coastal strip of the Colombian Caribbean were used. In this sense, the results show that the Hs values are higher during the time of trade winds between the city of Cartagena and Santa Marta (~ 3.5 m). However, the highest value of Hs in the analyzed period (5 m) occurred on San Andrés Island due to the transit of Hurricane Iota. In general way, the values of Hs on the coast are not strongly influenced by the passage of tropical cyclones, however, it significantly modifies the wave period (T_p), reaching values between 15 and 18 s (hurricanes Teddy and Epsilon). This suggests that in the coastal area of the Colombian Caribbean, signals of distant tropical cyclones can be detected in the values of T_p . Generally, the highest average values of Hs occur in the period of trade winds, although the maximum values correspond to the season of tropical cyclones. The low energy wave season is the one with the lowest values.

Keywords: significant wave height, Colombian Caribbean, trade winds, tropical cyclones.

1. Introducción

La energía del oleaje durante gran parte del año en el mar Caribe colombiano está fuertemente influenciada por la época de los vientos alisios y por la ocurrencia de la temporada de ciclones tropicales (Montoya *et al.*, 2018). El periodo de vientos alisios también llamado época seca, es caracterizada por vientos fuertes, lluvias escasas y ocurrencia de frentes fríos. Mientras que el periodo de ciclones es llamado época húmeda y se presentan lluvias intensas, y en promedio vientos débiles. Tanto en este periodo como el de los ciclones tropicales se incrementa la altura de ola significativa en la cuenca del Caribe colombiano (Moreno Calderón *et al.*, 2020). Así mismo, se presenta un periodo corto donde el oleaje es poco energético, la cual hace referencia al cambio de época seca a húmeda. Estos tres periodos configuran el denominado ciclo anual del oleaje, donde la altura de ola significativa del oleaje (H_s) tiene una relación directa con la variabilidad de los vientos del Caribe (Osorio *et al.*, 2009).

El mar Caribe es una cuenca cerrada protegida del oleaje tipo swell y está dominado por las olas de viento producidas localmente (Stopa *et al.*, 2013). Sin embargo, en los últimos años se ha presentado aumento en la energía de las olas, como se ha observado en la zona norte e insular del Caribe colombiano (Royero *et al.*, 2015). Así mismo, Ortiz-Royero (2012) establece que la zona del Caribe colombiano más vulnerable a la alta energía del oleaje es el Archipiélago de San Andrés (SAI), seguido de La Guajira (G), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), Cartagena (CTG), el golfo de Morrosquillo (GM) y Urabá (GU). Adicionalmente existen estudios sobre el conocimiento de características espaciales y temporales del oleaje en el mar Caribe, los cuales son los reportados por Carverley *et al.*, (2002) que investigaron la variabilidad climática de las olas durante condiciones de huracanes en el Caribe durante un periodo de 79 años. Estos autores concluyeron que tanto el clima de las olas extremas como el de las olas normales muestran respuestas a la variabilidad climática atmosférica a mayor escala.

En términos generales, se ha identificado que el comportamiento del oleaje a lo largo del Caribe colombiano depende de su ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas. La variabilidad de los procesos océano-atmosfera está determinada por la acción de fenómenos globales, regionales y locales en distintas escalas temporales. En los fenómenos globales se destaca el ENSO y la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Dentro de los regionales y locales los vientos alisios, los frentes fríos y la ocurrencia de ciclones tropicales

(Restrepo & Kjerfve, 2004). Según UNGR (2022) en el mar Caribe frecuentemente se presentan eventos extremos derivados de vientos intensos (alisios) y huracanes, estos se desarrollan entre diciembre-marzo y junio-noviembre, donde se presentan vientos superficiales intensos que generan oleaje local energético. Ortiz-Royero (2012) y posteriormente Ortiz-Royero *et al.*, (2013) mostraron que otros fenómenos meteorológicos como los frentes fríos pueden inducir eventos de olas extremas en el mar Caribe. Royero *et al.*, (2015) presentaron un análisis de los huracanes más importantes inductores del oleaje extremo en las zonas costeras de la isla de San Andrés en el mar Caribe colombiano.

En el caso de los ciclones tropicales, estos son la respuesta de la interacción entre el océano y la atmósfera, los cuales modifican la energía del oleaje, provocando que las olas puedan alcanzar los 10 metros (Zhang *et al.*, 2021). Así mismo, Ortiz-Royero (2009) investigó la altura de ola generada por el paso del huracán Lenny en el Caribe colombiano y analizó cuales son las zonas más vulnerables ante un evento ciclónico, a causa del movimiento hacia el este-sureste del huracán que facilitó la propagación del oleaje tipo swell hacia las costas de una manera significativa. Esto puede representar un peligro para las áreas costeras y con implicaciones en el recorrido de buques y plataformas offshore (Willoughby & Rahn, 2004). Inicialmente, son llamados ondas tropicales debido a la convergencia de los vientos de la costa oeste de África (Mo *et al.*, 2011).

Según Rubiera (2005) existe una distribución geográfica histórica de la incidencia de este fenómeno donde la zona del océano Atlántico, incluida el mar Caribe, experimenta el 11% de los huracanes, mientras que la zona del Pacífico Occidental presenta el mayor porcentaje de huracanes con un 39%. De manera particular, la costa Caribe colombiana no está identificada como zona potencialmente vulnerable a los ciclones tropicales. Es de notar que la línea de costa del Caribe colombiano posee aproximadamente 1,700 km, y en ella están asentadas algunas ciudades capitales con aproximadamente 52,215,503 de habitantes, grandes puertos marítimos y una importante infraestructura económica (DANE, 2023).

Pese a que se produce un porcentaje menor de ciclones tropicales en la cuenca del Caribe colombiano, se presentan efectos negativos debido a los fuertes vientos y oleaje manifestados principalmente en afectaciones socioeconómicas. El aumento y fortalecimiento de estos fenómenos se pueden atribuir al cambio climático, el cual está afectando directamente el océano y la atmósfera (Royero, 2007).

Sin embargo, se han producido eventos significativos que han afectado la Isla de San Andrés y el departamento de La Guajira (Ortiz-Royero, 2012), con un porcentaje de destrucción del 98% (Suarez, 2020). Los informes de la National Hurricane Center (NHC) registraron que en el año 2020 ingresaron 10 ciclones tropicales a la cuenca del Caribe. Entre ellos, tres transitaban por la cuenca Colombia, entre el 25 de julio y 18 de noviembre: Marco, Eta e Iota. El primero fue una depresión tropical, el segundo una tormenta tropical y el último alcanzó la categoría de huracán 4, siendo el más devastador para la zona insular del Caribe colombiano. Cabe resaltar que, Montoya *et al.*, (2018) sugieren que se espera un aumento en la intensidad de los huracanes en la cuenca del Caribe.

En épocas de vientos débiles e intensos (alisios) sobre la cuenca Caribe colombiana se presentan debido a la interacción entre el sistema Bermudas-Azores y el sistema de baja presión anclado de Panamá y la Vaguada Monzónica. Durante junio y agosto los vientos se fortalecen alcanzando el máximo de la temporada, con valores hasta de 12 m/s al interior de la cuenca, debido a la presencia del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (Andrade Anaya, 1993). Durante el trimestre septiembre-noviembre, el ascenso latitudinal y la actividad de la Vaguada Monzónica y su homóloga del océano Atlántico la ZCIT, dominan las condiciones de tiempo de la región, por lo que los vientos alcanzan el mínimo de velocidad de toda la temporada ciclónica y el año en general. Al comparar los valores máximos obtenidos en condiciones medias (sin alisios y ciclones tropicales) y los valores máximos obtenidos durante la ocurrencia de ellos, se observa claramente que son los causantes del oleaje más energético en el norte del mar Caribe (Osorio *et al.*, 2016).

No obstante, autores como Osorio *et al.*, (2016) sugieren que los procesos relacionados con el oleaje en el mar Caribe hasta el momento no se comprende adecuadamente, debido a la falta de información espacial fina, lo cual dificulta investigaciones a una escala regional y local. Es de notar que gran parte de la información medida del oleaje en el Caribe colombiano se realiza con boyas. Los datos obtenidos de las boyas está relacionada con los parámetros integrales (altura significativa, periodo asociado al pico espectral y dirección del oleaje). Por otro lado, su disponibilidad histórica es reducida, comparada con la información de las boyas de la NOAA que se encuentran en aguas profundas (Osorio *et al.*, 2016). Adicionalmente, los datos de satélites tienen una escala espacial (25 km) y temporal (mensualmente) gruesa. Como resultado de esta problemática, los campos espaciales y temporales de parámetros integrales del oleaje en el mar Caribe se obtienen por medio de modelos numéricos globales y regionales (en el mejor de los casos).

Por lo tanto, conocer la distribución espacial y temporal de la altura de ola significativa es de gran interés para la gestión del riesgo offshore y costero, seguimiento de rutas marítimas, control y apoyo a la gestión de flotas pesqueras, desarrollo de infraestructura costera, estudios de carácter ambiental y construcción de obras portuarias o de defensa contra procesos de erosión, siendo este último la mayor problemática presentada en el Caribe colombiano (Thomas *et al.*, 2011).

La importancia de los análisis espaciales y temporales regionales del oleaje, se propone el uso de la base de datos de Copernicus de la cual se pueden obtener los parámetros integrales del oleaje, basados en resultados del modelo de oleaje del proyecto Copernicus Meteo France Wave Model (MFWAN). Esta información permitirá analizar un ciclo anual del oleaje, abarcando periodos asociados a la época de ciclones tropicales y época de vientos alisios y frentes fríos. Debido a lo mencionado anteriormente, se propone como época de análisis abril de 2020 hasta abril 2021. Con estos elementos esperamos dar como respuesta a nuestra pregunta de investigación: ¿Cuál ha sido la variabilidad anual de la altura de ola significativa del oleaje en las costas del Caribe colombiano durante el periodo de 2020 y 2021?

Considerando esta pregunta se planteó la siguiente hipótesis, los mayores valores de altura de ola significativa están asociados a la época de vientos alisios y frentes fríos, con valores ligeramente superiores en lugares cercanos a la Isla de San Andrés, La Guajira y Barraquilla, y con valores menores en los golfos de Morrosquillo y Urabá. Este trabajo se divide en 9 capítulos. En el segundo se presenta el mar teórico, en el tercero los objetivos. En el cuarto la metodología, en el quinto los resultados y discusiones, en el sexto las conclusiones. En el séptimo las recomendaciones y trabajo a futuro, en el octavo las referencias y finalmente en el noveno los anexos.

2. Marco Teórico

El oleaje es definido como las ondas causadas por la acción del viento sobre la superficie del océano que viajan en forma de energía (Garrison, 2011). Cuando las olas salen de su sitio de generación viajan por el océano hasta llegar a la línea de costa donde generalmente disipan toda su energía (Universidad Cantabria *et al.*, 2000). La energía del oleaje depende principalmente de tres factores, la intensidad del viento, la duración del viento y del área donde sopla el viento (Pinet, 2019).

Las principales características de una ola son (Figura 1):

- *Cresta*: Parte más alta de la ola.
- *Valle*: Parte más baja de la ola.
- *Altura*: Distancia vertical que separa la cresta del valle.
- *Periodo*: Tiempo que le toma a dos crestas sucesivas pasar por un punto fijo.
- *Longitud de onda*: Distancia entre dos crestas sucesivas.

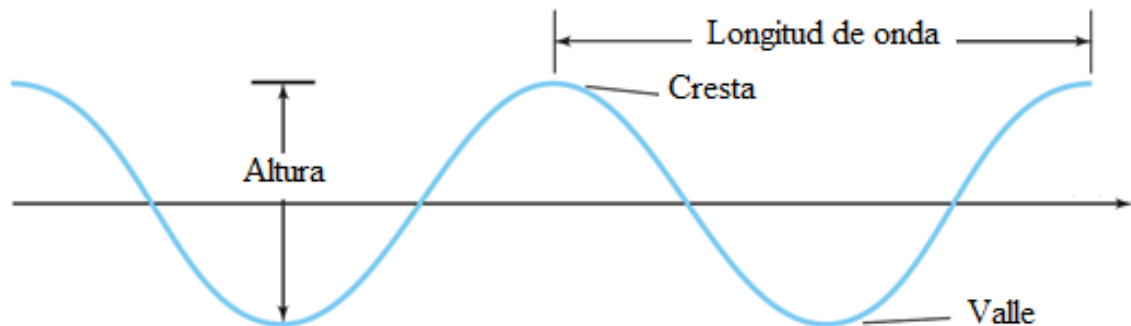


Figura 1. Características de una ola. Modificado de Pinet (2019).

La información medida del oleaje se realiza mediante boyas, de las cuales se obtienen sus parámetros integrales, a continuación, su definición:

- *Altura de ola significativa (H_s)*: Es calculada como el promedio del tercio más alto (33%) de las olas (medidas desde el valle hasta la cresta) que ocurren en un periodo determinado. Así como la integral del espectro direccional del oleaje (NWS, 2009).
- *Periodo asociado al pico espectral (T_p)*: Es el periodo que se puede asociar al valor más alto de energía en el espectro de frecuencia.

- *Dirección promedio del oleaje (Dir)*: Es la dirección de la mayor cantidad de energía asociado al espectro direccional.

Uno de los fenómenos que se tendrá en cuenta son las ondas tropicales. Estos se producen debido a condiciones de aguas cálidas cercanas a la superficie del océano (superiores a 27°C), una atmosfera que se enfría suficientemente rápido con la altura. Esto produce una atmosfera inestable debido a la convección húmeda en los niveles medios y bajos de la troposfera y valores bajos de cizalladura vertical del viento entre la superficie y la troposfera superior (inferior a aproximadamente 37 km/h), siendo esta ultima el cambio en la velocidad y dirección del viento con la altura (DIMAR, 2022).

La evolución de estos fenómenos se presenta en cuatro etapas, (1) *perturbación tropical*, está definida por una zona de inestabilidad atmosférica asociada a una baja de presión, lo que propicia generación de vientos convergentes, (2) *depresión tropical (TD)*, donde los vientos superficiales incrementan su magnitud hasta 62 km/h, debido a la existencia del área de baja presión, (3) *tormenta tropical (TS)*, en la cual se presentan magnitudes de viento entre 63 y 118 km/h, y en la que se puede observar una distribución de las nubes en forma de espiral, y por ultimo (4) *huracán (HU)*, el cual presenta vientos mayores de 119 km/h, la zona de nubes alcanza una extensión entre 500 y 900 km de diámetro y donde el ojo del huracán puede tener un diámetro entre 24 y 40 km (Castro, S., 2010). Los huracanes se clasifican por medio de la escala Safir-Simpson como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1. Escala de vientos huracanados Saffir-Simpson.

Categoría	Vientos sostenidos	Tipos de daños debido a los vientos
1	33-42 m/s 64-82 nudos 74-95 mph 119-153 km/h	Los vientos muy peligrosos producirán algunos daños.
2	43-49 m/s 83-95 nudos 96-110 mph 154-177 km/h	Los vientos extremadamente peligrosos causaran daños extensos.

3	50-58 m/s	Ocurrirán daños devastadores.
	96-112 nudos	
	111-129 mph	
	178-208 km/h	
4	58-70 m/s	Ocurrirán daños catastróficos.
	113-136 nudos	
	130-156 mph	
	209-251 km/h	
5	≥ 70 m/s	Se producirán daños catastróficos.
	≥ 137 nudos	
	≥ 157 mph	
	≥ 252 km/h	

Por otro lado, en la actualidad, el uso de modelos numéricos permite entender el comportamiento espacial de variables oceánicas. Esto ha sido de gran importancia para llevar a cabo actividades marítimas y/o costeras que conllevan planes de organización y creación para mitigar problemáticas que se presentan en el continente u océano.

De manera específica, en este estudio se usarán datos de la Hs cerca de la línea de costa del Caribe colombiano del modelo de oleaje global llamado MFWAN. Este es un modelo de tercera generación implementado por Météo-France. MFWAN utiliza los términos de disipación desarrollados por Ardhuin et al. (2010). Fue actualizado en noviembre del 2014 por medio del proyecto de investigación europeo “*my wave*” (Janssen *et al.*, 2014). La batimetría que usa el modelo es ETOPO2/NOAA. La malla del modelo es irregular con una distancia decreciente en la dirección latitudinal cerca de los polos y en el Ecuador la distancia en dirección longitudinal es fija con un tamaño de cuadrícula de $1/10^\circ$. El modelo MFWAN usa datos de viento pronosticados cada 3 horas del sistema atmosférico IFS-ECMWF y realiza asimilación de altímetro con el paso de tiempo de 6 horas. Sus salidas son cada 6 horas y el espectro de onda se discretiza en 24 direcciones y 30 frecuencias desde 0.035 hasta 0.58 Hz (Ardhuin *et al.*, 2010; P. Janssen *et al.*, 2014).

Por otro lado, se usaron datos de vientos de reanálisis provenientes de modelos atmosféricos. Esos análisis se realizan con la intención de mejorar y precisar los datos y/o

predicciones. Los datos de reanálisis usan para sus procesos de calibración y validación observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente complejo.

ERA5 son datos de reanálisis del ECMWF que usa un modelo atmosférico de quinta generación de las últimas ocho décadas. El modelo asimila datos y usa un método utilizado por los centros de predicción numérica donde cada 12 horas se combina el pronóstico anterior con las nuevas observaciones disponibles. Esto produce de manera óptima una mejor estimación de las condiciones atmosféricas. ERA5 proporciona estimaciones de variables meteo-marinas por hora para la atmósfera, océano y superficie terrestre. Los datos se obtienen en una malla regular de latitud y longitud de 0.25° . Sin embargo, cada compartimiento (aire, mar y tierra) posee resoluciones horizontales diferentes (Tabla 2) para brindar una mejor definición de los datos (Hersbach *et al.*, 2023).

Tabla 2. Datos disponibles en el reanálisis ERA5.

	Atmosfera	Océano
Proyección	Malla regular de latitud y longitud	
Cobertura horizontal	Global	
Resolución horizontal	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$
	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	$1^\circ \times 1^\circ$
Cobertura temporal	Desde 1940 al presente	
Resolución temporal	Cada hora	
Formato de archivo	GRIB	
Frecuencia de actualización	Diario	

En este trabajo fueron analizados los datos de vientos superficiales de ERA5 en la cuenca del Caribe colombiano. Esto con el fin de terminar la variabilidad anual del viento en los años 2020 y 2021.

De igual manera se usaron datos de estaciones meteorológicas a cargo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ubicadas en el aeropuerto de Cartagena y Riohacha con las siguientes características:

Tabla 3. Datos disponibles de las estaciones meteorológicas 14015080 y 15065180 a cargo del IDEAM.

Estación	Aeropuerto Rafael Núñez	Aeropuerto Almirante Padilla
Código	14015080	15065180
Ubicación	Cartagena de Indias, Bolívar.	Riohacha, La Guajira.
Altitud	2 m s.n.m	4 m s.n.m
Estado	Activa	
Tipo de tecnología	Automática con telemetría	
Resolución temporal	Cada hora	
	abril 2020 - marzo 2021	abril 2020 - abril 2021

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la variabilidad espacial y temporal de la altura de ola significativa del oleaje en la costa del Caribe colombiano en el periodo de 2020 y 2021.

3.2 Objetivos específicos

- Definir los periodos de análisis de altura de ola significativa con base en los datos medidos y de reanálisis.
- Comparar los datos de altura de ola significativa proporcionado por el modelo numérico (MFWAN) y los datos medidos in situ por boyas ubicadas en el mar Caribe (NOAA).
- Determinar espacial y temporalmente los valores de altura significativa a escala anual en el Caribe colombiano.

4. Área de Estudio y Metodología

4.1 Área de estudio

El mar Caribe limita al sur con América del sur, al oeste con América central, al este con las Antillas menores y al norte con las Antillas mayores. Está conectado al noreste con el golfo de México por el canal de Yucatán y al este con el Océano Atlántico tropical. La extensión superficial del mar Caribe colombiano es cercana a los 590,000 km² y la costa Caribe colombiana tiene una longitud aproximada de 1,760 km. Las principales ciudades costeras son Riohacha (RIO), Santa Marta (SM), Barranquilla (BRQ) y Cartagena (CTG), además de otros sitios de interés en el Caribe como lo son el golfo de Morrosquillo (GM), golfo de Urabá (GU) y la Isla de San Andrés (SAI) (Figura 2).

La zona del Caribe insular de Colombia incluye el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, que está compuesto por tres islas principales y un grupo de islas menores, atolones y arrecifes de coral (Palacin, 2022).

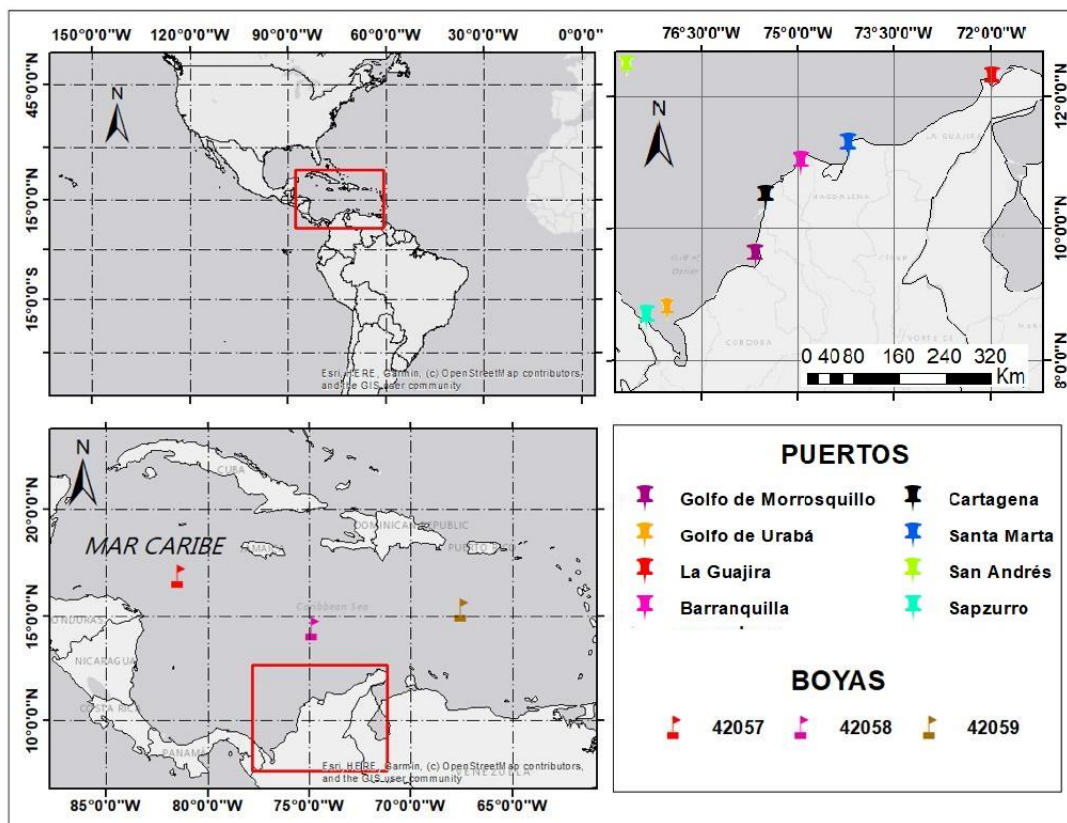


Figura 2. Mapa del área de estudio.

En la cuenca Caribe se identifican dos periodos climáticos principales: época seca (diciembre-abril), en la cual predomina la baja precipitación y vientos intensos (alisios) que soplan del norte/noreste y la época húmeda (mayo-noviembre), en la cual predominan las altas precipitaciones y vientos relativamente débiles de norte a sur. Sin embargo, en esta última época además se presenta la temporada de ciclones tropicales que se extiende de junio a noviembre (Osorio *et al.*, 2016).

Es importante tener en cuenta que durante gran parte del año el oleaje en el mar Caribe colombiano presenta una dirección predominante del este, mientras que para la zona sur y suroccidental la dirección del oleaje es del noroeste. Los valores de altura de ola oscilan entre los 0.5 y 3 metros, registrando los valores de ola más altos en la zona oceánica (entre los 10° y 15° de latitud y 74° y 80° de longitud) con respecto a la zona costera (Dagua, 2019). En general el periodo asociado al pico espectral de las olas es de 4 segundos en zonas costeras y 8.5 segundos en la zona oceánica. La altura como el periodo de oleaje se modifica en los meses junio-agosto y diciembre-marzo y crecen en dirección este a oeste (Dagua, 2019).

4.2 Métodos

Se obtuvieron los datos de vientos superficiales, ciclones tropicales y parámetros integrales del oleaje de diferentes plataformas, tales como: IDEAM, ERA5, NHC, NDBC y MFWAN (por sus siglas en ingles).

4.2.1 Vientos superficiales

Los datos empleados para el análisis de la velocidad del viento fueron descargados de ERA5 a través de la página <https://cds.climate.copernicus.eu/>. Se obtuvieron las componentes U y V del viento para los años 2020 y 2021 en las coordenadas del mar Caribe.

Junto con la información de ERA5, se analizaron los datos de velocidad del viento de estaciones meteorológicas a cargo del IDEAM ubicadas en el aeropuerto de Cartagena y Riohacha. Teniendo en cuenta que las bases de datos tenían resoluciones temporales y espaciales diferentes, se procesaron de acuerdo con lo descrito en la Tabla 4. Además, se tuvo en cuenta la información de los boletines meteomarineros mensuales del Caribe colombiano de los años 2020 y 2021 (<https://cecolodigital.dimar.mil.co/view/divisions/BMCC/2020.html>) a cargo del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).

Tabla 4. Información de vientos superficiales analizados.

	Datos originales	Datos procesados
ERA5: Ubicación cerca la boya 42058 (Caribe Central)	Componentes U y V	Velocidad y dirección
	Datos horarios 2020 y 2021	Datos horarios desde abril 2020 a abril 2021 Filtro de 240 datos (10 días)
IDEAM: Ubicación aeropuertos de Cartagena y Riohacha		Velocidad y dirección
	Datos cada 10 minutos	Datos horarios desde abril 2020 a abril 2021 Filtro de 240 datos (10 días)

Esta información permitió analizar y determinar los periodos interanuales de variación del viento: época de oleaje poco energético (vientos débiles), alisios (vientos fuertes) en la línea de costa del Caribe colombiano.

4.2.2 Ciclonés tropicales

Las trayectorias e información de los ciclones tropicales para el año 2020 se extrajeron de los reportes del Centro Nacional de Huracanes (NHC, en sus siglas en inglés) a través de su página <https://www.nhc.noaa.gov/data/>.

Los registros de la NHC contienen información la latitud, longitud, presión atmosférica, velocidad del viento y estadísticos meteorológicos sobre cada ciclón/huracán que se presenta, con un intervalo de registro de seis horas, y los datos se encuentran disponibles para el océano Atlántico, Pacífico oriental y Pacífico Central (Gallón, 2020).

La temporada de huracanes en el Atlántico para el año 2020 fue muy activa, presentando las formaciones de ciclones tropicales a un ritmo récord. Esta fue catalogada como la temporada más activa registrada en la historia, con un total de 31 ciclones tropicales o subtropicales, 30 tormentas con nombre, 13 huracanes, de los cuales seis alcanzaron la categoría 5 (Tabla 5). Adicionalmente, los registros indican que desde el año 2005 no se registraba una temporada en la cual fuese necesario nombrar los ciclones tropicales con letras del alfabeto griego (IDEAM, 2020), es decir, no se presentaban demasiados ciclones tropicales a grandes escalas desde la temporada del 2005.

Tabla 5. Ciclones tropicales presentados en el océano Atlántico durante el año 2020. Los ciclones tropicales resaltados hacen referencia a aquellos que ingresaron en la cuenca Colombia. Información tomada del NHC.

Nombre	Fecha	Magnitud máxima del viento (kits)	Categoría
Arthur	16-19 de mayo	51	TS
Bertha	27-28 de mayo	46	TS
Cristóbal	1-9 de junio	51	TS
Dolly	22-24 de junio	40	TS
Édouard	4-6 de julio	40	TS
Fay	9-11 de julio	51	TS
Gonzalo	21-25 de julio	54	TS
Hanna	23-26 de julio	81	HU
Isaías	30 de julio- 4 de agosto	81	HU
Diez	31 de julio- 1 de agosto	30	TD
Josephine	11-16 de agosto	40	TS
Kyle	14-15 de agosto	46	TS
Laura	20-29 de agosto	130	HU
Marco	21-25 de agosto	65	HU
Omar	31 de agosto- 5 de septiembre	35	TS
Nana	1-3 de septiembre	65	HU
Paulette	7-22 de septiembre	89	HU
Rene	7-14 de septiembre	40	TS
Sally	11-17 de septiembre	94	HU
Teddy	12-23 de septiembre	119	HU
Vicky	14-17 de septiembre	46	TS
Beta	17-22 de septiembre	54	TS
Wilfred	17-21 de septiembre	35	TS
Alpha	17-19 de septiembre	46	TS
Gamma	2-6 de octubre	65	HU
Delta	5-10 de octubre	119	HU

Épsilon	19-26 de octubre	100	HU
Zeta	24-29 de octubre	100	HU
Eta	31 de octubre-14 de noviembre	130	HU
Theta	10-15 de noviembre	59	TS
Iota	13-18 de noviembre	135	HU

Esta información es fundamental para determinar el inicio y final de la temporada de ciclones tropicales. Y, además, analizar el efecto generado en la altura de ola significativa y el periodo asociado al pico espectral, los cuales, en el mayor de los casos se ve afectado por un aumento de ambas variables en las fechas mencionadas antes, específicamente para Marco, Eta e Iota, ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano.

4.2.3 *Parámetros integrales del oleaje*

4.2.3.1 Boyas NOAA (NDBC).

Se obtuvieron datos de oleaje de las boyas a cargo de la NOAA (<https://www.ndbc.noaa.gov/>). De manera específica, se escogieron las boyas 42057, 42058 y 42059 que se encuentran en el mar Caribe (Anexo 2) a distancias relativamente cercanas a la línea de costa del Caribe colombiano (Tabla 6). Es de notar que la boya 42058 se encuentra dentro del límite marítimo de Colombia.

Tabla 6. Información de las boyas en el mar Caribe a cargo de la NOAA.

Estación	Ubicación geográfica	
42057	Caribe Occidental	16°55'6"N 81°27'42"W
42058	Caribe Central	14°50'24"N 75°2'48"W
42059	Mar Caribe Oriental	15°18'0"N 67°28'58"W

4.2.3.2 Modelo numérico MFWAN.

Los datos de oleaje se obtuvieron por medio de la página de Copernicus Marine Service <https://marine.copernicus.eu/> desde el producto “Global Ocean Waves Analysis and Forecast”. Esta información tiene una resolución espacial de 0.083° x 0.083° (~ 8.3 km x 8.3 km) y temporal de 3 horas desde año 2019 hasta la actualidad. Se seleccionaron las celdas cercanas a la franja litoral del Caribe colombiano. Los datos seleccionados para los análisis fueron la altura de ola

significante (VHM0), periodo pico espectral (VTPK) y dirección de oleaje (VMDR) proporcionados en formato NetCDF-4.

Los datos proporcionados por ERA5, IDEAM, NDBC y MFWAN fueron analizados y cuidadosamente procesados mediante el lenguaje de programación y cálculo numérico Matlab®. Estos datos permitieron determinar la variación anual de vientos, realizar la validación de los datos del modelo numérico respecto a los datos de las boyas de la NOAA. Los sitios seleccionados se muestran en la Figura 3. Con los datos de los parámetros integrales de estos sitios se realizaron diagramas tipo Howmöller para evaluar su variación espacio/temporal.

Para la determinación de los límites para las épocas (en especial las épocas de vientos) se realizó un promedio móvil de 240 datos, que equivalen a 10 días, teniendo en cuenta que se analizaron los datos horarios de ambas bases de dato. El promedio se realizó con el fin de determinar de manera adecuada los momentos en los cuales los vientos tenían un incremento para determinar la época de alisos, o en su defecto una disminución para la época de oleaje poco energético en el área de estudio.

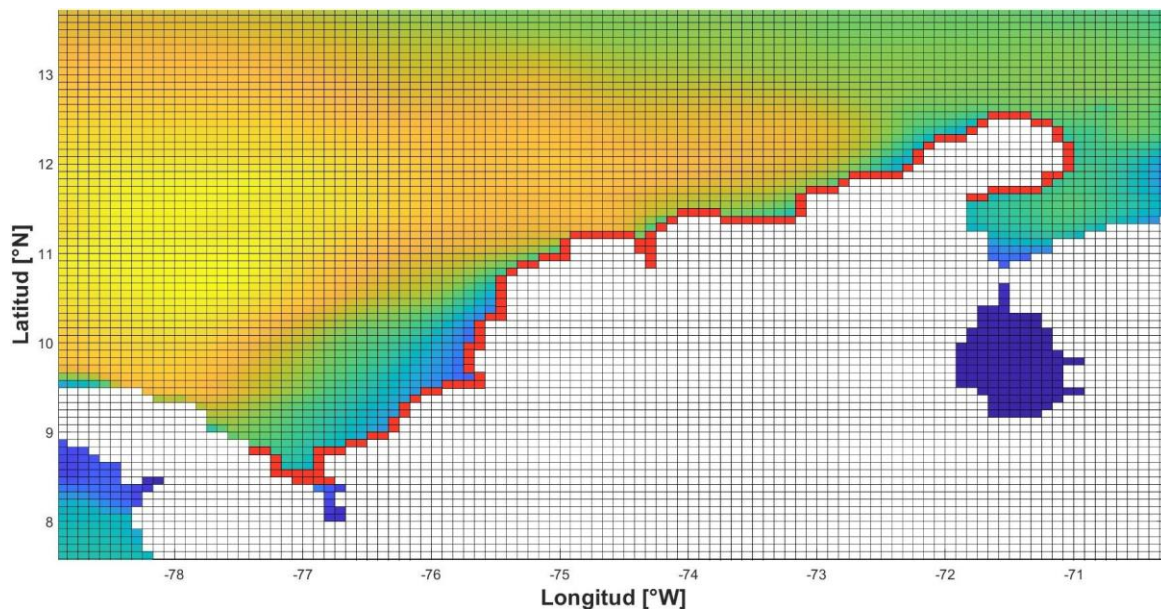


Figura 3. Ubicación espacial de los sitios donde se seleccionaron los datos de los parámetros integrales del modelo MFWAN.

5. Resultados y Discusión

5.1 Delimitación de las épocas

Se definieron los límites de las épocas con los datos de vientos superficiales con base en los datos de ERA5, estaciones meteorológicas del IDEAM y boletines mensuales meteomarineros del CIOH. En el caso de ciclones tropicales se usó la base de datos de HURDAT en 2020.

El comportamiento del viento superficial en la cuenca del mar Caribe durante el periodo analizado permitió delimitar el inicio y final de las épocas de vientos débiles y fuertes (Figura 4). A pesar de que los datos analizados no muestran límites marcados del inicio de vientos débiles o fuertes, se observa una tendencia a aumentar progresivamente entre diciembre de 2020 y marzo de 2021. Esto sugiere que en estos últimos meses puede ubicarse la época de vientos fuertes/alisios.

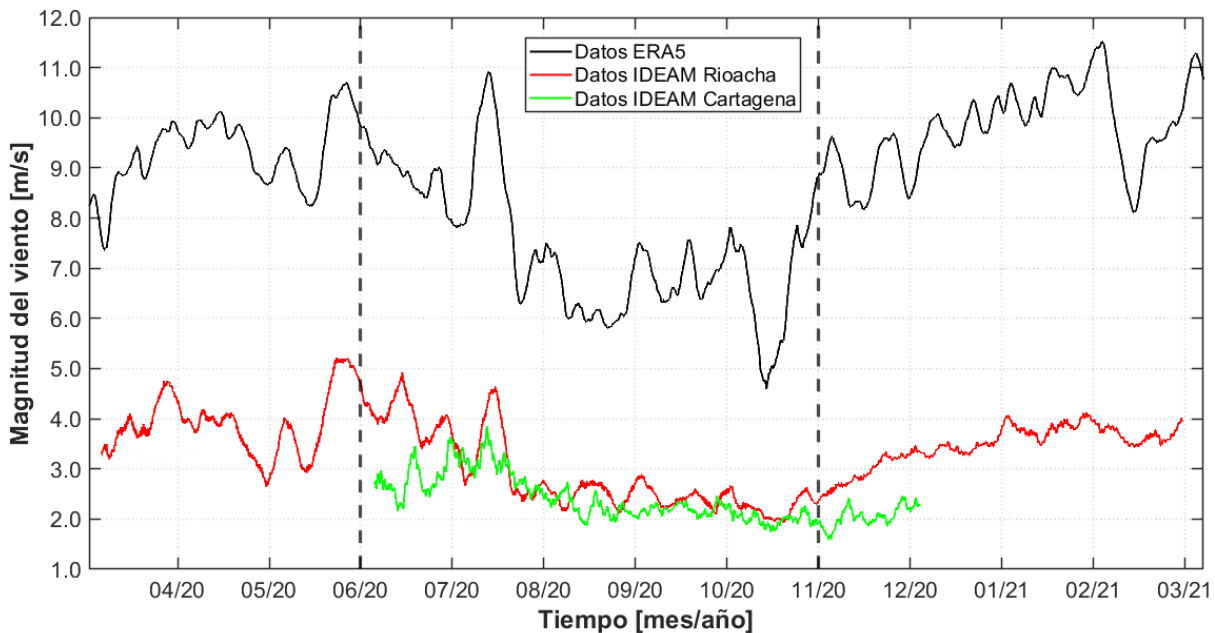


Figura 4. Límites de las épocas de vientos débiles y vientos fuertes/alisios. La primera línea discontinua indica el final de la época de vientos débiles y la segunda el inicio de los vientos fuertes/alisios.

Luego, se definió la época de ciclones tropicales en el Caribe, de acuerdo las fechas de los ciclones tropicales presentados en el océano Atlántico durante la temporada de huracanes del año 2020 (Tabla 5). En el Caribe la temporada inició el 25 de julio con el tránsito de la tormenta tropical Gonzalo y finalizó el 18 de noviembre con el huracán Iota. Por tanto, entre julio y noviembre de 2020 se definió como la época de ciclones tropicales para el análisis de la variación de la Hs. Sin

embargo, es importante resaltar que no todos los ciclones que se presentaron en la temporada de huracanes ingresaron a la cuenca Caribe y Colombia.

Según la NHC en la cuenca Caribe se presentaron diez ciclones tropicales de diferentes categorías y etapas, de los cuales, tres ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano (ver Tabla 5). El primero en ingresar a la cuenca Colombia fue Marco, comportándose como depresión tropical, seguido Eta, el cual en su punto inicial se comportó como depresión tropical y al paso de los días aumentó su categoría mientras transitaba por la zona insular del Caribe colombiano hasta catalogarse como tormenta tropical y, por último, Iota, siendo el más energético y devastador para la zona insular del Caribe colombiano. Debido a la poca diferencia de días del tránsito de Eta y el tiempo que perduró en la zona de estudio (Anexo 1). Iota presentó las mayores repercusiones en la zona de estudio debido a su intensidad y evolución, llegando a ser huracán categoría 5 en la escala Saffir-Simpson.

Asimismo, los boletines meteomarineros mensuales de los años 2020 y 2021 indican que desde marzo de 2020 se presentó una regulación en los flujos de viento con condiciones estables hasta mayo, siendo este el mes de transición entre la época seca y húmeda. Sin embargo, en mayo la zona norte continuaba dominada por los vientos alisios. Para junio había comenzado la temporada de ciclones tropicales en el océano Atlántico, pero no eran evidentes condiciones inestables en la franja costera. Por lo tanto, la época de oleaje poco energético (eOPE) fue seleccionada entre abril y junio de 2020. La primera señal de ciclones coincide con la información de la NHC en el Caribe, desde julio hasta noviembre, en el cual se presentaron ondas y ciclones tropicales, lluvias y frentes fríos en la cuenca Caribe y por ende este se definió como la época de ciclones tropicales (eCT). Por último, la época de vientos alisios (eVA) se definió desde diciembre 2020 (inicio de época seca) hasta finales de marzo de 2021 donde se presentaron fuertes vientos y lluvias escasas.

Con base en lo anterior se definieron los límites de las tres épocas analizadas (época de oleaje poco energético, época de ciclones tropicales y época de vientos alisios). Estas conforman el ciclo anual del oleaje, con la finalidad de analizar de manera general y específica la variabilidad de los parámetros integrales del oleaje en la franja costera del Caribe colombiano.

Tabla 7. Límites de las épocas de análisis del oleaje.

Época	Inicio	Final
Oleaje poco Energético (eOPE)	Abril 2020	Junio 2020
Ciclones tropicales (eCT)	Julio 2020	Noviembre 2020
Vientos alisios (eVA)	Diciembre 2020	Marzo 2021

5.2 Comparación de los datos del modelo numérico con datos *in situ*

Se compararon los valores de H_s del modelo numérico MFWAN y las mediciones de las boyas a cargo de la NOAA, con la finalidad de validar la información suministrada por el modelo en la cuenca Caribe.

Los resultados mostrados en la Figura 5, presentan una alta correlación lineal con valores entre 0.79 y 0.92 en la boya 42058. Además, se observan valores de RMSE menores a 0.24 m y de bias menores a -0.17. Esto sugiere que los datos del modelo representan de manera adecuada los valores medidos de H_s .

Cabe resaltar que las boyas se encuentran en aguas profundas y lejos de la línea de costa y que solo la boya 42058 se encuentra dentro del límite marítimo colombiano (Anexo 2). Con base a lo anterior, y teniendo en cuenta los resultados estadísticos de las boyas (en especial la boya 42058) se supondrá en adelante que los datos del modelo representan de manera adecuada las condiciones de oleaje cerca de la costa.

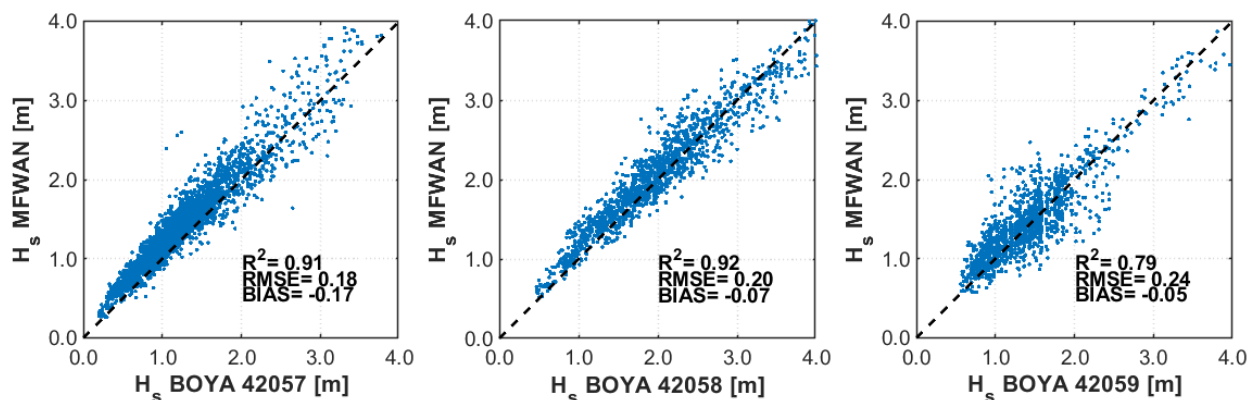


Figura 5. Comparación de los datos de altura de ola significativa del modelo MFWAN y los datos medidos *in situ* por las boyas a cargo de la NOAA.

5.3 Análisis de los parámetros integrales de oleaje (altura de ola significativa)

La validación del modelo en aguas profundas permitió confirmar la fiabilidad de sus datos para la zona costera. En la Figura 6 se muestra el diagrama de Howmöller, que indica la variación de la altura de ola significativa, en el Anexo 3 el periodo asociado al pico espectral y en el Anexo 4 la dirección del oleaje a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano, entre abril de 2020 y marzo de 2021. Es de notar que en este trabajo solo se analizará el gráfico asociado a Hs.

Los resultados obtenidos sugieren que los mayores valores de Hs fueron de 3.5 m y se registraron entre CTG, BRQ y SM, entre enero y marzo de 2021 (Figura 6), meses en los cuales se presentaron los vientos más intensos en el área asociados a la época de alisios (Figura 4). De igual forma, entre CTG y G, se evidenciaron Hs de 2 y 3 m durante agosto, mes asociado a la época de ciclones tropicales, y específicamente coincidió con la formación y tránsito de la tormenta tropical Marco en la cuenca del Caribe colombiano. Así mismo, se pueden evidenciar que SM y G presentaron Hs hasta de 3 m. Para el caso del GM las alturas de Hs fueron menores con respecto a los otros lugares, debido principalmente a su ubicación geográfica y geomorfología, la cual le permite estar protegidos de la energía directa del oleaje (principalmente del noreste).

Al analizar de manera detallada el comportamiento de Hs para cada lugar seleccionado sobre la línea de costa, durante las épocas definidas, eOPE, eCT y eVA, se puede evidenciar que la zona insular del Caribe colombiano experimenta una gran variación, comportamiento similar en BRQ. Cabe resaltar que, a pesar de la protección natural que genera la barrera arrecifal a la isla de San Andrés (Plazas Moreno et al., 2011), se pueden presentar aumentos de la Hs significativos cuando se presentan eventos locales (fuertes vientos) y extremos como lo fue en la época de ciclones tropicales, destacando el tránsito del huracán Iota, registrando una Hs de 5m aproximadamente (Figura 7).

Todos los lugares escogidos en la franja costera experimentaron una variación de la Hs en cada una de las tres épocas. Sin embargo, los tres lugares más notorios son BRQ, SM y G (Figura 7). En detalle BRQ se destaca por mantener los mayores valores Hs en todas las épocas, de manera específica de 0.5 m para eCT y 3.5 m para eVA. Por otro lado, en SM y G se observaron valores entre 0.5 m y 2.8 m aproximadamente. Los menores valores se presentaron en la eCT. En la Figura 7 se observa que para SM el máximo valor registrado se presenta en la eVA, mientras que para G se presenta en la eOPE.

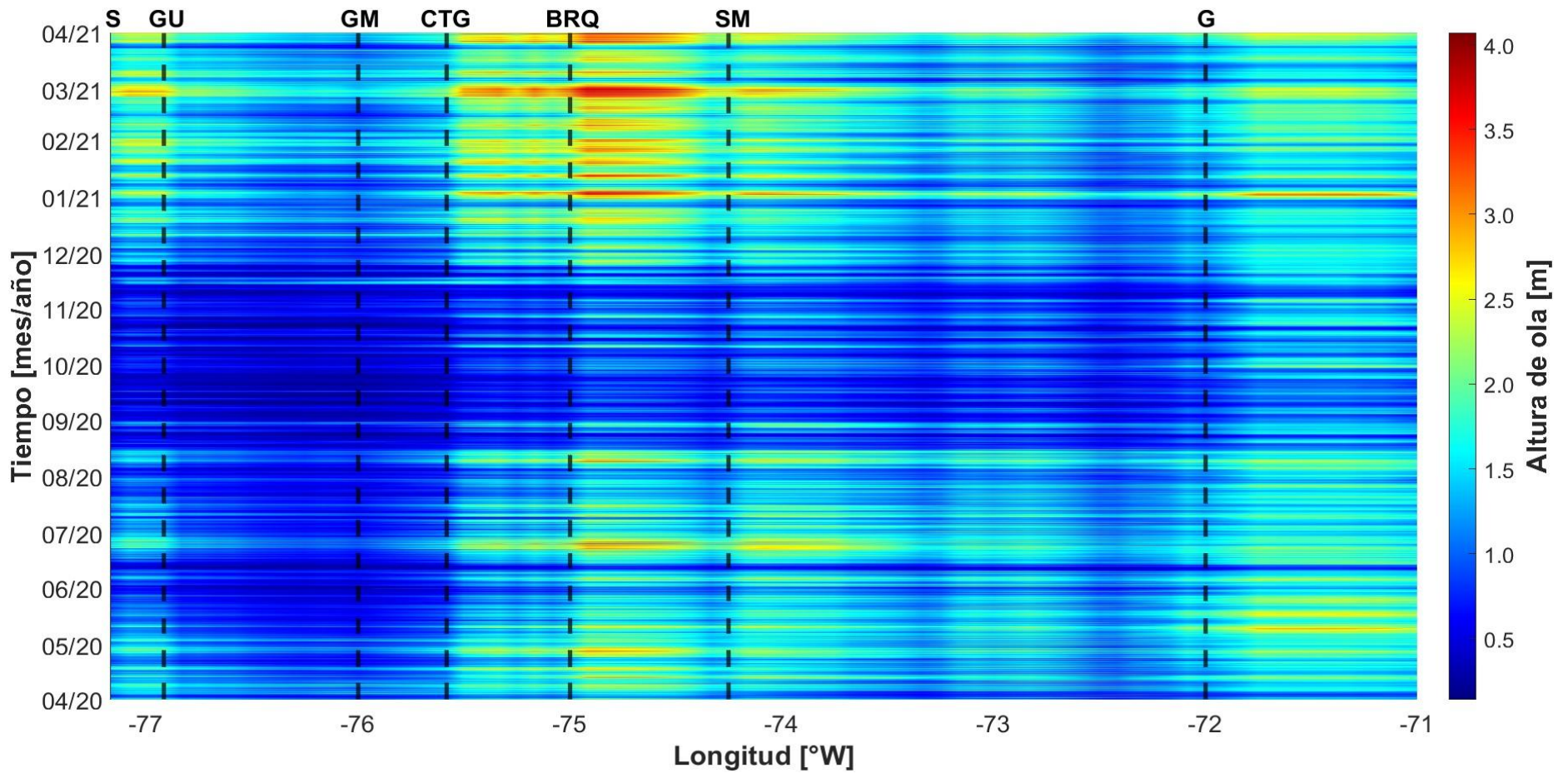


Figura 6. Diagrama tipo Howmoller para valores de altura de ola significativa a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).

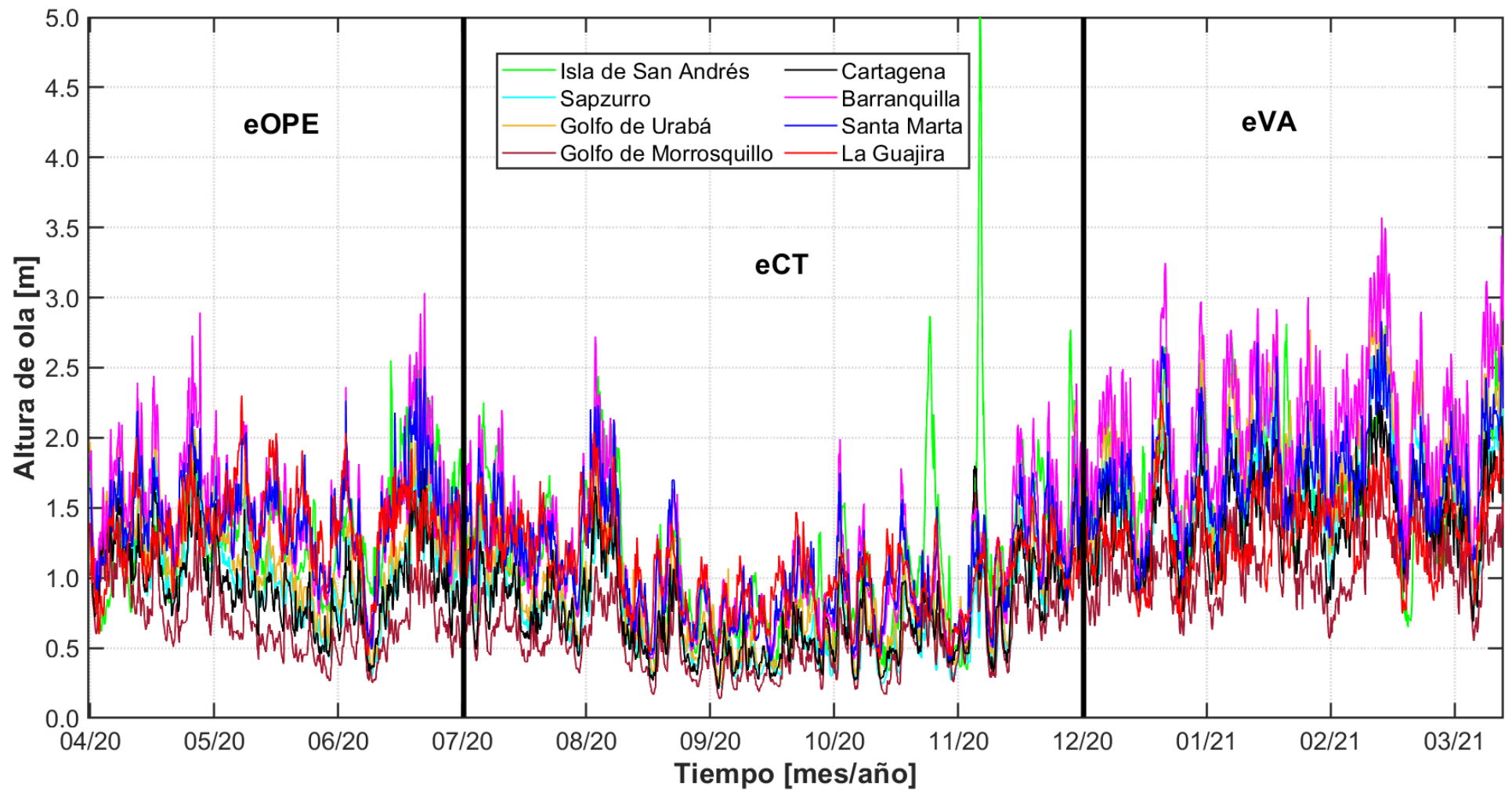


Figura 7. Serie temporal de la altura de ola significativa para cada uno de los sitios de interés. Las líneas verticales de color negro delimitan las épocas de oleaje poco energético (eOPE), ciclones tropicales (eCT) y vientos alisios (eVA).

A pesar de que la eOPE fue definida como la época de oleaje poco energético, se puede observar que la altura de ola significativa varió entre 0.3 y 3 m (Figura 8). Es de notar que en abril aún se puede percibir la influencia de los vientos alisios en la región, por ende, las condiciones de la Hs alcanzan a presentar alturas hasta de 3 m aproximadamente en BRQ. Esto coincide con el reporte del CIOH en su boletín meteomarino de abril de 2020, donde se menciona que los primeros 15 días del mes de abril en el Caribe se presentaron vientos entre los 10 y 30 nudos (5 m/s y 15 m/s).

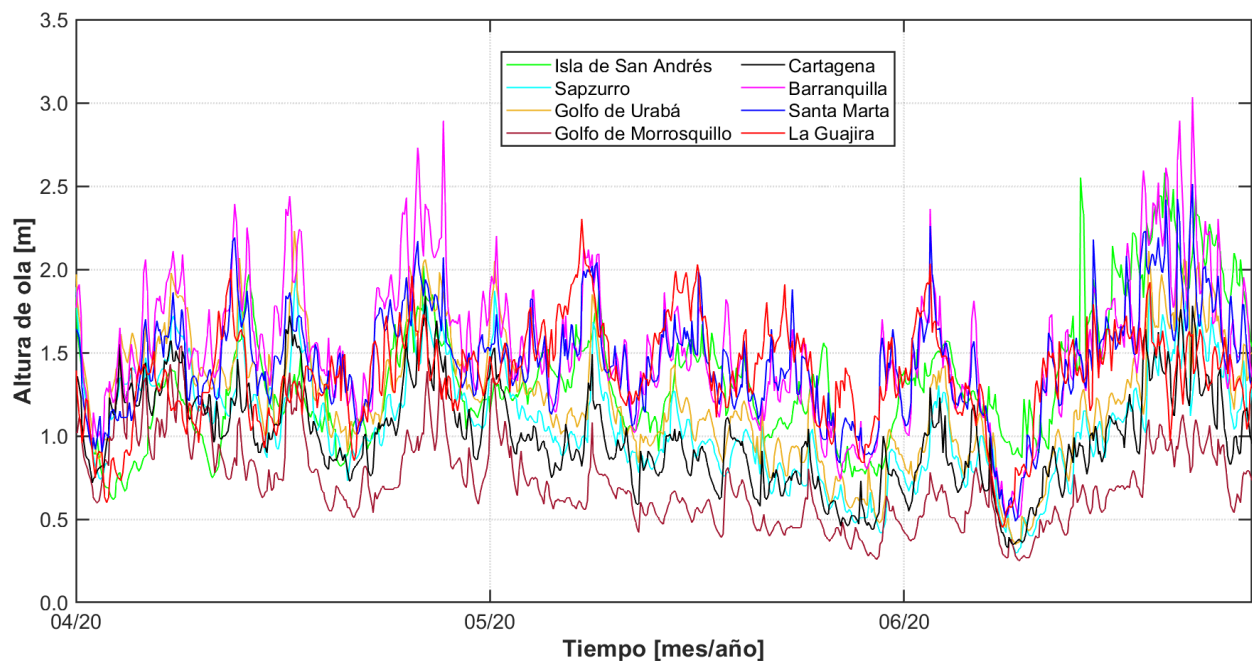


Figura 8. Variación de la altura de ola significativa durante la eOPE (abril a junio).

En el mes de mayo se presentó la transición de época seca a húmeda, donde los vientos y la Hs fueron menos energéticos, y se logró evidenciar una disminución en la Hs en la mayor parte de la franja costera (Figura 8). No obstante, se registraron altas intensidades de vientos (alisios) en la zona norte de la región.

En la eCT el comportamiento de la Hs es la más variable de todas debido a las condiciones que se presentan durante esta temporada, con incrementos puntuales de la intensidad del viento asociados a la formación de ciclones. Durante los meses de julio a noviembre se presentaron picos relacionados al tránsito de ciclones tropicales en la cuenca del Caribe colombiano, afectando la Hs en la franja costera de la zona de la región, provocando que en G y SM se presenten Hs de hasta

2.3 m. Finalmente, en junio se refleja nuevamente un aumento importante en la Hs, con olas hasta de 3 m, asociadas al inicio de la temporada de ciclones tropicales del Atlántico Norte.

Como se mencionó, durante la eCT es común observar gran variación en la Hs (Figura 9), donde el aumento de la velocidad de los vientos debido a los ciclones tropicales es la condición principal para aumentar la Hs. Se observó cómo entre julio y noviembre se registraron valores de Hs máximos entre 3 y 5 m, relacionados con el tránsito de huracanes dentro de la zona de estudio.

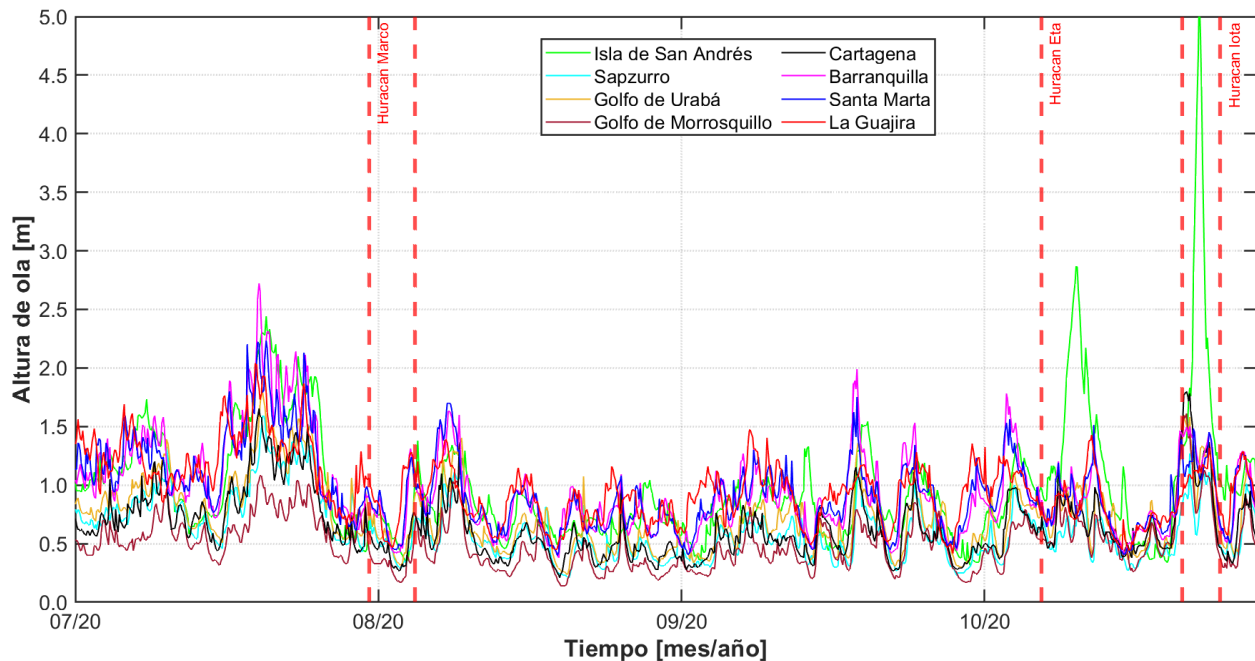


Figura 9. Variación de la altura de ola significativa durante la eCT (julio a noviembre). Las líneas verticales discontinuas indican la fecha del tránsito y/o formación de los ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano.

En la eCT los mayores valores de Hs se pueden asociar al tránsito por la cuenca del Caribe colombiano de los huracanes Eta e Iota (Figura 10). Específicamente en SAI se alcanzaron valores máximos de Hs de 2.9 m entre el 31 de octubre y 14 de noviembre debido al huracán Eta y de 5 m entre el 13 y 18 de noviembre debido a Iota.

Por su parte, la depresión tropical Marco se formó en la cuenca del Caribe colombiano (Anexo 1), pero no modificó de manera importante los valores de Hs. Al contrario, la altura máxima registrada fue de 1.3 m (Figura 10), lo que indica que el valor se encontró dentro del promedio de los valores del Caribe colombiano para esta época entre 0.5 y 3 m (Dagua, 2019). Sin embargo, previo a la formación de Marco se presenta un aumento hasta de 2.7 m en todos los lugares seleccionados (Figura 9) especialmente en BRQ. Este incremento en Hs se atribuye al tránsito de

una Onda tropical del Este en el centro del mar Caribe, reportada por el CIOH (Moreno Calderón *et al.*, 2020g). Este es un fenómeno tropical típico en la época húmeda que se desplaza de este a oeste, y genera precipitaciones, vientos con intensidades de 20 a 25 nudos (10 m/s y 12 m/s) e incremento en la Hs entre 2.1 y 3 m.

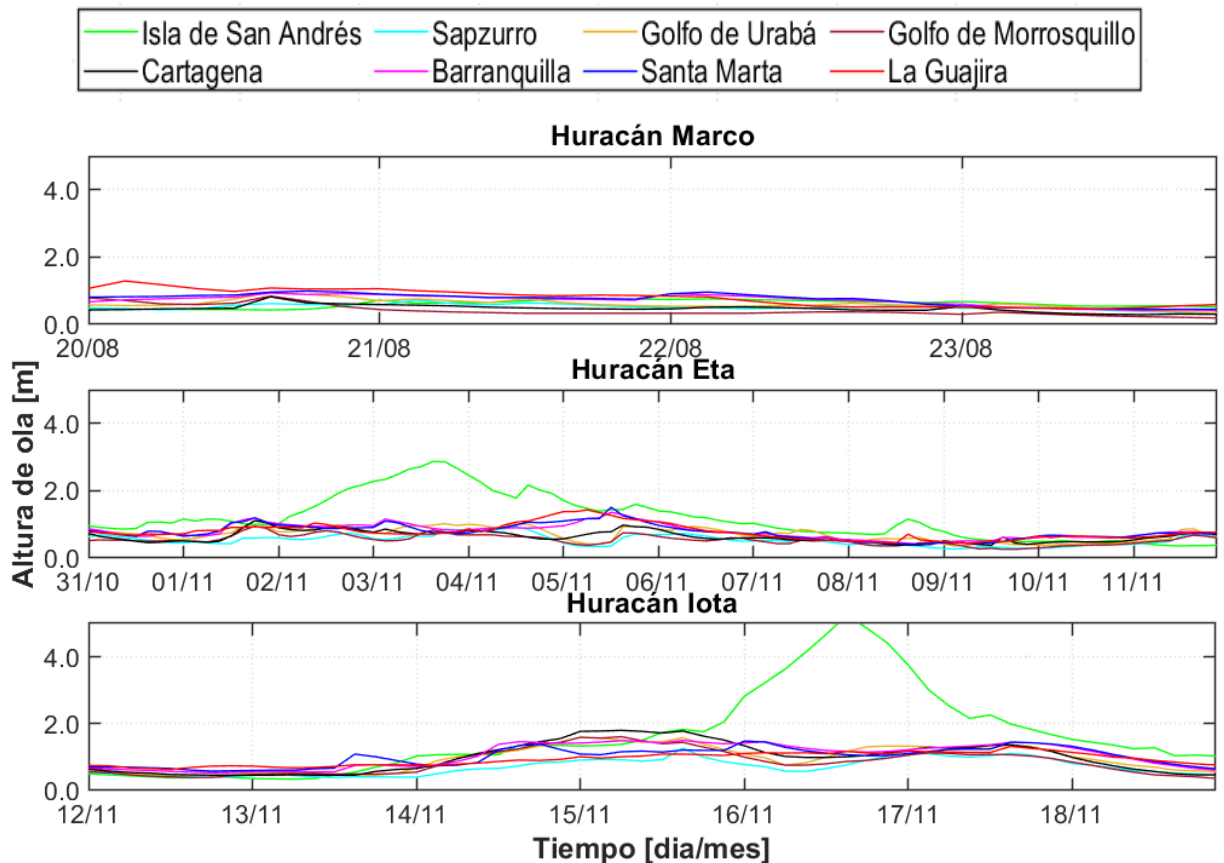


Figura 10. Variación de la altura de ola significativa en los lugares seleccionados sobre la línea de costa del Caribe colombiano durante el tránsito y formación de los ciclones tropicales que ingresaron al Caribe colombiano: Marco, Eta e Iota.

Se analizó el periodo de las olas (T_p), con el fin de identificar posibles modificaciones durante la eCT. De acuerdo con los resultados de la Figura 11, se logra evidenciar que el periodo del oleaje se altera durante esta época. Sin embargo, los mayores incrementos en el T_p no coinciden con el paso de los tres ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano (Figura 11), esto indica que, a los ciclones Marco, Eta e Iota no se les atribuye los valores significativos del aumento del periodo de las olas. Se puede observar en la Figura 11 que los picos asociados a este variable se presentan luego del tránsito del huracán Teddy y Épsilon, los cuales se presentaron fuera del área de estudio.

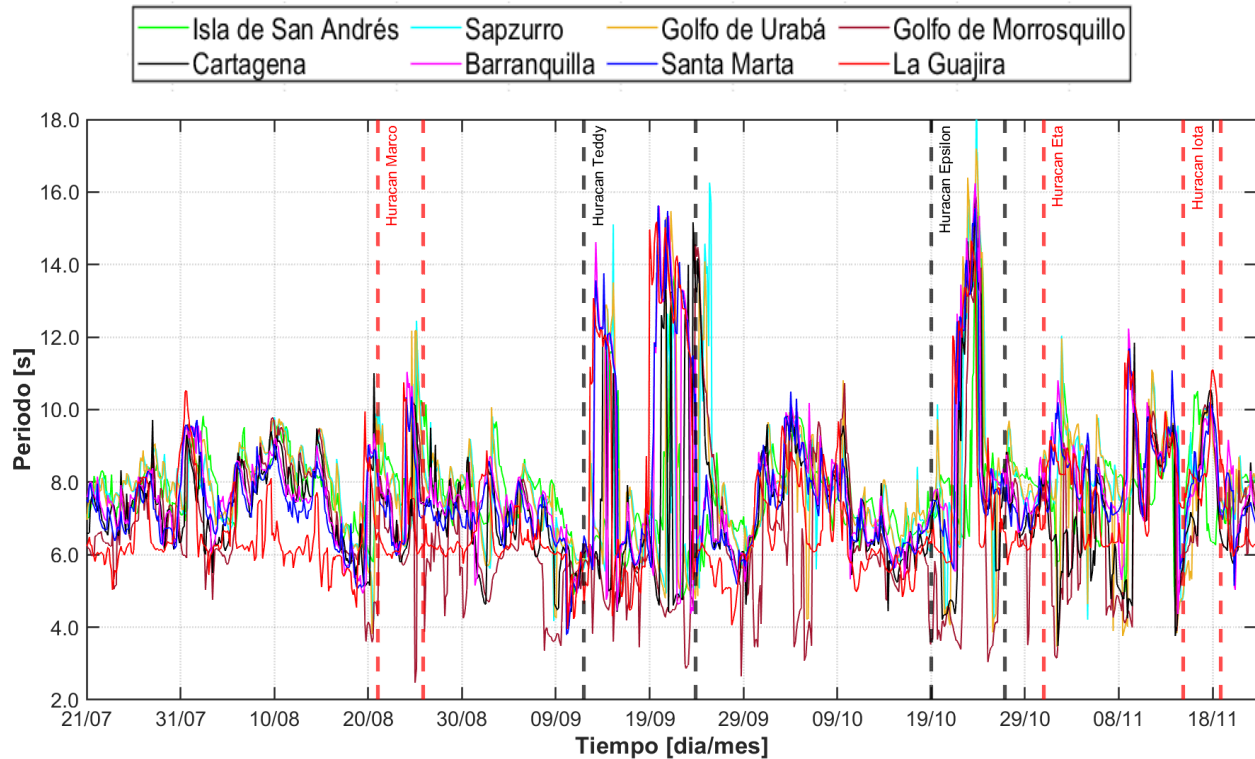


Figura 11. Variación de T_p durante la eCT (julio a noviembre). Las líneas verticales discontinuas color rojo indican la fecha del tránsito y/o formación de los ciclones que ingresaron a la cuenca del Caribe colombiano, y las líneas discontinuas color negro indican los ciclones que se presentaron por fuera de la cuenca.

De manera específica, el comportamiento del T_p en el mes de septiembre, presentó valores máximos entre 16 y 18 s. Cabe resaltar que, en septiembre no se registraron ciclones en el área de estudio. Sin embargo, se presentaron ciclones en otros lugares del océano Atlántico norte, tal como se evidenció en la Tabla 5. Los resultados sugieren que los valores máximos de T_p en S se pueden relacionar con el tránsito del huracán Épsilon y Teddy (Anexo 5).

Los periodos de 15 y 16 s se presentaron entre el 9 y 29 de septiembre y el máximo de 18 s entre el 19 y 29 de octubre, coincidiendo con el tránsito de Teddy de categoría 4 (catalogado como el quinto ciclón más fuerte de la temporada de huracanes del Atlántico) y Épsilon de categoría 3, respectivamente (Figura 11). A pesar de que su trayectoria y formación están alejadas del área de

estudio de esta investigación (Anexo 1 y Anexo 5), los resultados sugieren que se generaron perturbaciones en el oleaje (T_p) que alcanzan a evidenciarse sobre la franja del Caribe colombiano.

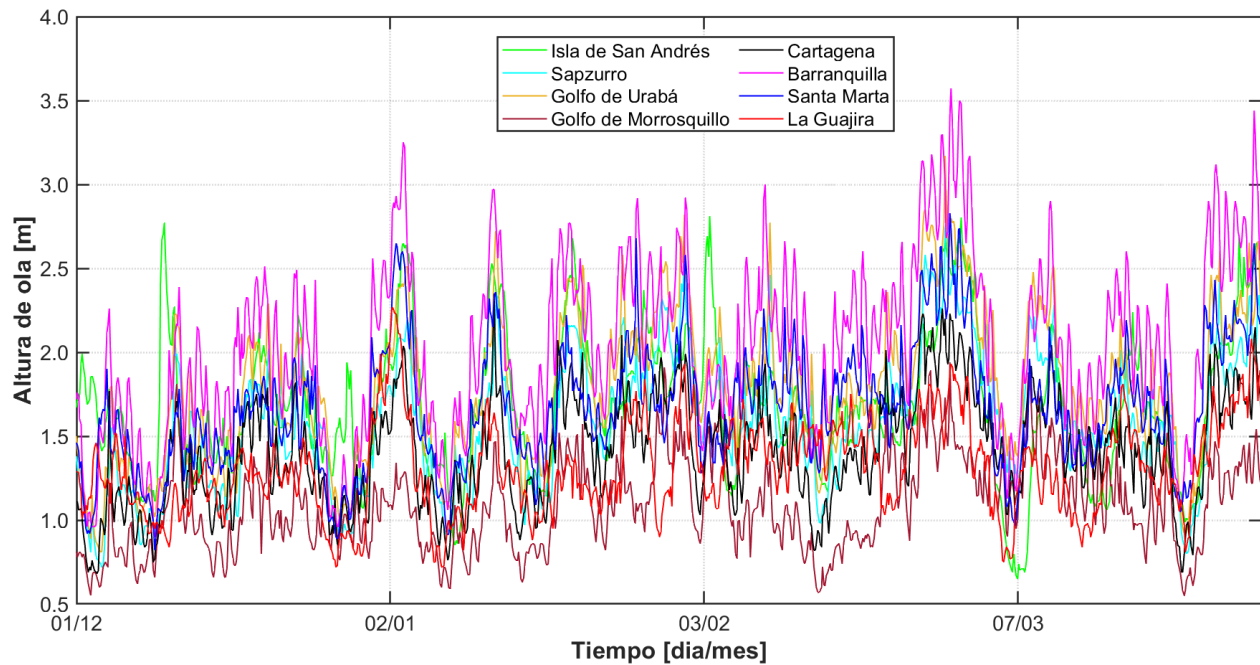


Figura 12. Variación de la altura de ola significativa en la eVA (diciembre a marzo).

De acuerdo con los resultados obtenidos para la eVA BRQ presentó valores de H_s que sobrepasan los 3.5 m a finales de febrero, seguido SM con valores hasta de 2.5 m y SAI con valores de aproximadamente 2.8 m entre enero y marzo del año 2021 (Figura 12). Cabe resaltar que GU presenta valores de H_s representativos, teniendo en cuenta que los golfos, tal como se mencionó anteriormente, no presentan alta variación de H_s por su ubicación geográfica y geomorfología. Sin embargo, GU presenta un comportamiento similar a otros lugares seleccionados sobre la franja costera, con valores de 2.8 m, superando otros lugares sobre la línea de costa con mayor influencia de la energía del oleaje, tales como CTG y G, las cuales presentan valores entre los 0.4 y 2.4 m para esta época.

Es importante tener en cuenta que, el comportamiento de los valores de H_s en GU y GM se deben a la ubicación y disponibilidad de datos del punto escogido para este análisis. En el caso de GU se ubica específicamente en la parte exterior del golfo (mar abierto) y en el caso de GM hacia el interior del golfo.

6. Conclusiones

Durante los años 2020 y 2021 en el Caribe se presentaron tres épocas que permiten caracterizar el oleaje. Una época donde se presentan vientos débiles principalmente del sur (eOPE), otra en la que prevalecen este tipo de vientos y donde se generan ciclones tropicales (eCT) y finalmente una época donde predominan los vientos alisios (eVA).

La variabilidad espacio/temporal de la altura de ola significativa en la costa del Caribe colombiano está fuertemente influenciada por la variación anual de la velocidad del viento (época de vientos fuertes y débiles). Las mayores alturas de olas en el Caribe colombiano se registraron en la eVA en la ciudad de Barranquilla, con alturas de 3.6 y 3 m para eVA y eCT, respectivamente. Sin embargo, durante la eCT, específicamente en noviembre, SAI registró la mayor altura de ola significativa de todo el periodo analizado, alcanzó una altura de 5 m causado por el tránsito del huracán Iota.

El comportamiento de la Hs en los golfos del mar Caribe (GM y GU) presentaron valores entre los 0.4 y 2.8 m respectivamente, con valores mínimos en el GM. Cabe resaltar que el punto que representa al GU se encuentra en la parte externa del golfo mientras que los datos de GM están en el interior, esto debido a la disponibilidad de datos del modelo número MFWAN.

El paso de los huracanes por fuera de la cuenca del Caribe colombiano no modificó de manera importante los valores de Hs en los lugares analizados sobre la línea de costa. Sin embargo, si modificó el Tp, presentándose periodos entre 15 y 18 s. Este resultado sugiere que en los valores de Tp de la zona costera del Caribe colombiano se pueden detectar señales de ciclones tropicales lejanos.

Los datos de altura de ola significativa, del modelo de olas MFWAN presentaron una alta correlación respecto a la medición de las boyas de la NOAA. Específicamente con la boya 42058, la cual se encuentra dentro del límite marítimo de Colombia. Este resultado sugiere que los datos proporcionados por el modelo numérico para la línea de costa del Caribe colombiano pueden ser usados en análisis de la variabilidad de la altura de ola significativa en la zona costera del área de estudio.

7. Recomendaciones y Trabajo a Futuro

Teniendo en cuenta las afectaciones que se presentan actualmente de erosión costera sobre la línea de costa del Caribe colombiano, se propone como trabajo a futuro analizar la variabilidad espacial y temporal del periodo asociado al pico espectral y la dirección promedio del oleaje en su ciclo anual para la zona costera del Caribe colombiano. Esto, teniendo en cuenta que, en este trabajo se detectaron señales de incremento del periodo a causa de ciclones tropicales y/o tormentas lejanas fuera de la zona de estudio.

De la misma manera se recomienda para efectos de mejoría en la metodología utilizada, tener en cuenta información de las estaciones meteorológicas (especialmente, velocidad del viento) en las principales ciudades costeras para analizar y determinar de manera precisa la delimitación de las épocas y/o temporadas que se presentan en el Caribe colombiano, de igual forma se requiere los datos proporcionados por boyas oceanográficas ubicadas en la cuenca del Caribe colombiano, o en su defecto cerca de la línea de costa, para así obtener una malla detallada de información sobre el comportamiento de los parámetros integrales en nuestra zona de estudio.

Con base a esto, se propone dar seguimiento continuo a las boyas oceanográficas que se encuentran en el Caribe colombiano a cargo del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), puesto que, para los años analizados en este trabajo (2020 y 2021) no se obtenía información de las boyas antes mencionadas. Cabe resaltar que, esta información es de suma importancia para la toma de decisiones oportunas sobre la problemática de erosión costera que presenta actualmente el Caribe colombiano y el comportamiento de los parámetros integrales ante frentes fríos y temporada de huracanes, el cual con el paso del tiempo según Royero (2007) el fortalecimiento y magnitud de estos eventos extremos van en aumento debido al cambio climático que experimenta todos los compartimientos, atmosfera, tierra y océano.

8. Referencias

- Andrade Amaya, C. A. (1993). Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe.
- Calverley, M. J., Szabo, D., Cardone, V. J., Orelup, E. A., & Parsons, M. J. (2002). Wave climate study of the Caribbean Sea. In Proc. Seventh Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting.
- Castro, S. C. D. (2010). Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México. *Interciencia*, 35(4), 306-310.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas-CIOH. (2020). PRONÓSTICO DE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS. <https://cioh.dimar.mil.co/meteorologia/PreCaAltamar.php>
- Dagua, C. (2019). Caracterización del clima marítimo en el mar Caribe colombiano: optimización de redes de medida. https://cecoldodigital.dimar.mil.co/2662/1/dimar_2019_Paismares_08_49-51.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (22 de marzo de 2023). ¿Cuántos Somos? <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/cuantos-somos>
- Dirección General Marítima. (2022). Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales del Caribe y la Cuenca Colombia 1981-2021. (documento inédito). Ministerio de Defensa Nacional.
- Dirección General Marítima. (14 de agosto de 2023). Glosario. <https://www.dimar.mil.co/glosario>
- EcuRed. (12 de julio 2019). Vientos alisios. https://www.ecured.cu/Vientos_Alisios
- F. Ardhuin, R. Magne, J-F. Filipot, A. Van der Westhuyzen, A. Roland, P. Quefeulou, J. M. Lefèvre, L. Aouf, A. Babanin and F. Collard: Semi empirical dissipation source functions for wind-wave models: Part I, definition and calibration and validation at global scales. *Journal of Physical Oceanography*, March 2010.
- Gallón, A. (2020). ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DEL OLEAJE PROVOCADO POR EL HURACÁN HARVEY EN EL SECTOR NOR-OESTE DEL GOLFO DE MÉXICO. [Tesis de pregrado]. Universidad de Antioquia.
- Garrison, T. (2011) *Essentials of Oceanography*, Belmont USA: Editorial Cengage Learning.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.adbb2d47. [Consultado en marzo, 2023]. Disponible en internet: <<https://cds.climate.copernicus.eu/>>.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; Gonzales Montes, Stephanie y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021a). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.100 / Abril de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; Gonzales Montes, Stephanie y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021b). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.101 / mayo de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; Gonzales Montes, Stephanie y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021c). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.102 / junio de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; Gonzales Montes, Stephanie y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021d). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.103 / julio de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; González Montes, Stephanie Andrea y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021e). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.104 / agosto de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; González Montes, Stephanie Andrea y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021f). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.105 / septiembre de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; González Montes, Stephanie Andrea y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021g). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.106 / octubre de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; González Montes, Stephanie Andrea y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021h). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.107 / noviembre de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana; González Montes, Stephanie Andrea y Dagua Paz, Claudia Janeth. (2021i). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.108 / diciembre de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020). Finalización temporada de huracanes (Comunicado especial N°156). <http://www.ideam.gov.co/documents/78690/112399859/COMUNICADO+ESPECIAL+N%C2%B0156+FINALIZACION+TEMPORADA+DE+HURACANES+2020.pdf/12563bc9-ee5c-4b56-8b38-cbda349a340c?version=1.0>
- Londoño, G., & Murillo, E. (2017) Variabilidad espacio-temporal del nivel del mar en la costa del caribe colombiano [Tesis de pregrado no publicada]. Universidad de Antioquia.

- Mesa, O. J., Poveda, G., & Carvajal, L. F. (1997). *Introducción al clima de Colombia (Introduction to the Climate of Colombia)*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 390.
- MetEd. (2023). *Wave Glossary*. https://www.meted.ucar.edu/glossaries/wavegloss_es.htm
- Mo K, Bell GD, Thiaw W (2001) Impact of sea surface temperature anomalies on the Atlantic tropical storm activity and West African rainfall. *J Atmos Sci* 58:3477–3496
- Montoya, R. D., Menendez, M., & Osorio, A. F. (2018). Exploring changes in Caribbean hurricane-induced wave heights. *Ocean Engineering*, 163, 126-135.
- Montoya Ramirez, R. D., Osorio Arias, A. F., Montoya Jaramillo, L. J., & Hernández, J. C. (2015). *Interacción océano atmósfera en el mar caribe: Relación con los patrones de oleaje*. Sello Editorial de la Universidad de Medellín.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Montes, Stephanie. (2020a). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.85 / enero de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Montes, Stephanie. (2020b). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.86 / febrero de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Montes, Stephanie. (2020c). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.87 / marzo de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Ed. Dimar.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Montes, Stephanie. (2020d). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.88 / abril de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Ed. Dimar.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Montes, Stephanie. (2020e). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.89 / mayo de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana. (2020f). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.90 / junio de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana. (2020g). *Boletín Meteomarinero Mensual del Caribe Colombiano No.91 / Julio de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.
- Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana.

(2020h). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.92 / agosto de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana. (2020i). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.93 / septiembre de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana. (2020j). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.94 / octubre de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie y Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana. (2020k). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.95 / noviembre de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth y Herrera Moyano, Diana Patricia. (2020l). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.96 / diciembre de 2020*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Pico Hernández, Sergio Andrés; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Gonzales Montes, Stephanie; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana y Gonzales Torres, Stephanie. (2021a). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.97 / enero de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General

Moreno Calderón, Maritza; Vallejo, Saúl; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia; Rodríguez Tobar, Ángela Tatiana y Gonzales Torres, Stephanie. (2021b). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.98 / febrero de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

Moreno Calderón, Maritza; Vallejo, Saúl; Dagua Paz, Claudia Janeth; Herrera Moyano, Diana Patricia y Gonzales Torres, Stephanie. (2021c). *Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.99 / marzo de 2021*. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima.

National Hurricane Center (2020). 2020 Atlantic Hurricane Season. <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2020&basin=atl>.

National Hurricane Center (2023). Glossary of NHC Terms. <https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml#t>. [Consultado en abril, 2023].

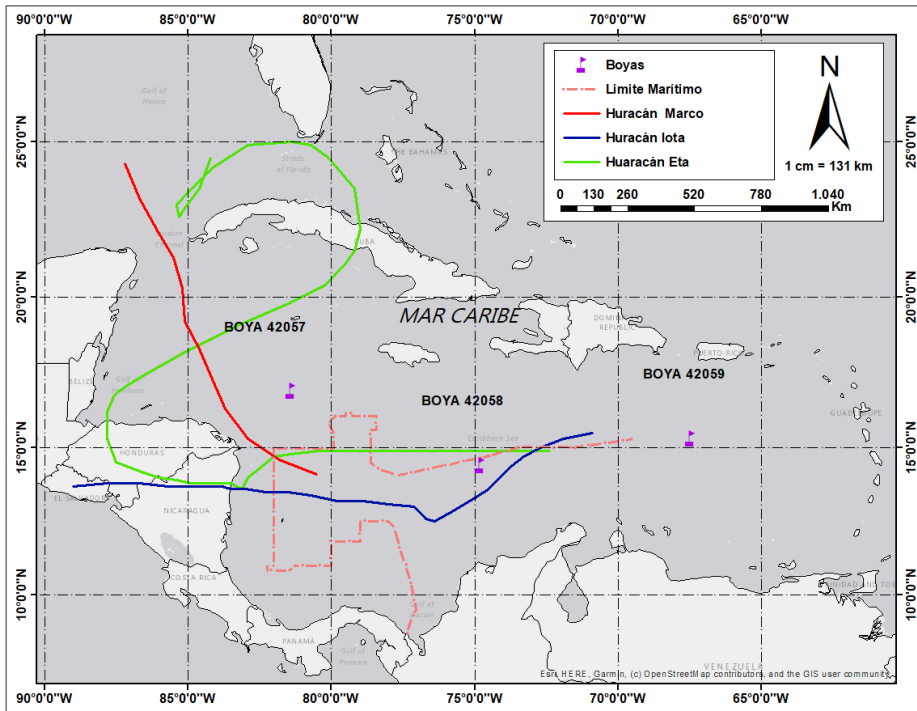
National Weather Service (25 de junio de 2009). National Weather Service Glossary. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://w1.weather.gov/glossary/>

Ortiz-Royero, J. C. (2009). Aplicación de un modelo paramétrico de vientos y un modelo de oleaje espectral para el estudio del oleaje máximo generado por el huracán Lenny en las costas del Caribe colombiano en 1999.

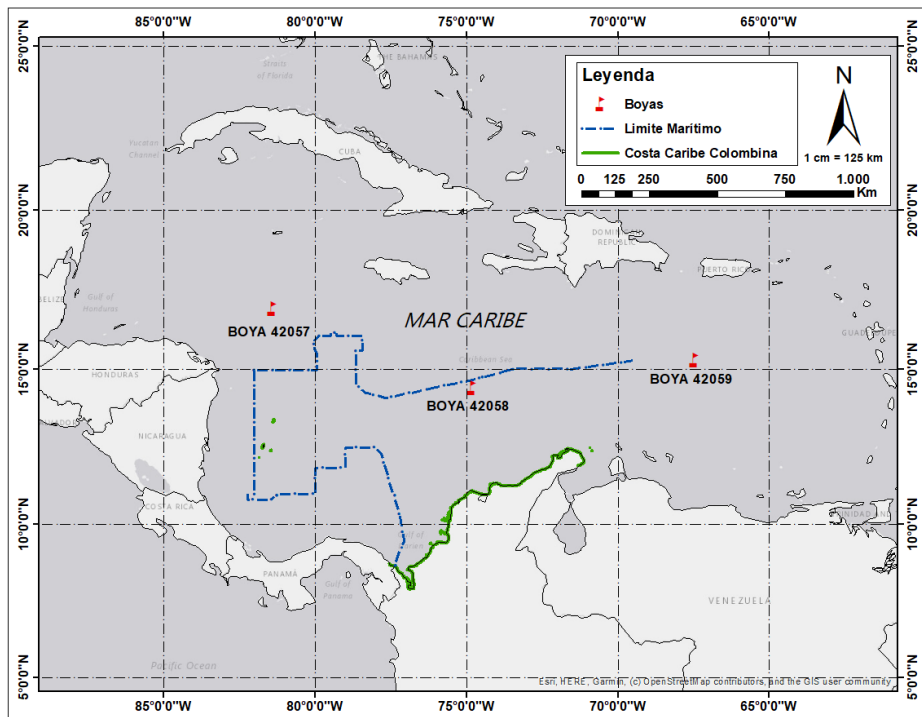
- Ortiz-Royero, J. C. (2012). Exposure of the Colombian Caribbean coast, including San Andrés Island, to tropical storms and hurricanes, 1900–2010. *Natural hazards*, 61(2), 815-827.
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J., & Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2797-2804.
- Osorio, A. F., Montoya, R. D., Ortiz, J. C., & Peláez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research*, 56, 119-131.
- Osorio, A. F., Mesa, J. C., Bernal, G. R., & Montoya, R. D. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Boletín científico CIOH*, (27), 37-56.
- P. Janssen, L. Aouf, A. Behrens, G. Korres, L. Cavalieri, K. Christensen, O. Breivik: Final report of work-package I in my wave project. December 2014.
- Palacin Suárez, A. P. (2022). Análisis geomorfológico de los fondos submarinos de las islas Cayos de Quitasueño y Cayos de Serrana en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Caribe Colombiano).
- Pinet, P. R. (2019). *Invitation to oceanography*. Jones & Bartlett Learning.
- Ramírez, M. G. (1998). Ciclones Tropicales que Entraron a la Península de Yucatán de 1970 a 1995. *Revista Geográfica*, 124, 153–171. <http://www.jstor.org/stable/40992751>
- Restrepo J., Kjerfve B. 2004. The Pacific and Caribbean rivers of Colombia: water discharge, sediment transport and dissolved loads. En: 169-187. Lacerda L., Santelli R., Duursma E., Abrao J. (Ed.). *Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments*. Springer Verlag. Berlin. 169-187 pp
- Royero, J. C. O. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900. *Boletín científico CIOH*, (25), 54-60.
- Royero, J. C. O., Moreno, J. M. P., & Lizano, O. (2015). Evaluation of extreme waves associated with cyclonic activity on San Andrés Island in the Caribbean Sea since 1900. *Journal of Coastal Research*, 31(3), 557-568.
- Royero, J. C. O., Moreno, J. M. P., & Lizano, O. (2015). Evaluation of extreme waves associated with cyclonic activity on San Andrés Island in the Caribbean Sea since 1900. *Journal of Coastal Research*, 31(3), 557-568.
- Rubiera, J. (2005, January). Early warning for hurricanes. In *Thematic session cluster 2 World conference on disaster reduction*. Kobe, Japan. January (pp. 18-22).
- Stopa, J. E., Cheung, K. F., Tolman, H. L., & Chawla, A. (2013). Patterns and cycles in the climate forecast system reanalysis wind and wave data. *Ocean Modelling*, 70, 207-220.
- Suarez, L. (6 de Julio de 2020). Temporada de huracanes: Colombia, cada vez más vulnerable. *Impacto Tic*. <https://impactotic.co/temporada-de-huracanes-colombia-cada-vez-mas-vulnerable/>

- Thomas, Y. F., Nicolae Lerma, A., Durand, P., Posada, B., García Valencia, C., & Andrade Amaya, C. A. (2011). Altura significativa del oleaje en la Cuenca Colombiana del Caribe, datos de altimetría radar.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2022). Riesgo por ciclón (caracterización general).
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/36815/Riesgo%20por%20cicl%C3%B3n%20tropical.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Universidad de Cantabria., Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.), Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas. (2000). Documento de referencia, Volumen I, Dinámicas. Santander, España. Editorial Universidad de Cantabria.
- US Department of Commerce, N. (2009) Significant wave height, National Weather Service.
https://www.weather.gov/key/marine_sigwave
- Willoughby, H. E., & Rahn, M. E. (2004). Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model. *Monthly Weather Review*, 132(12), 3033-3048.
- Zhang, H., He, H., Zhang, W. Z., & Tian, D. (2021). Upper ocean response to tropical cyclones: a review. *Geoscience Letters*, 8(1), 1-12.

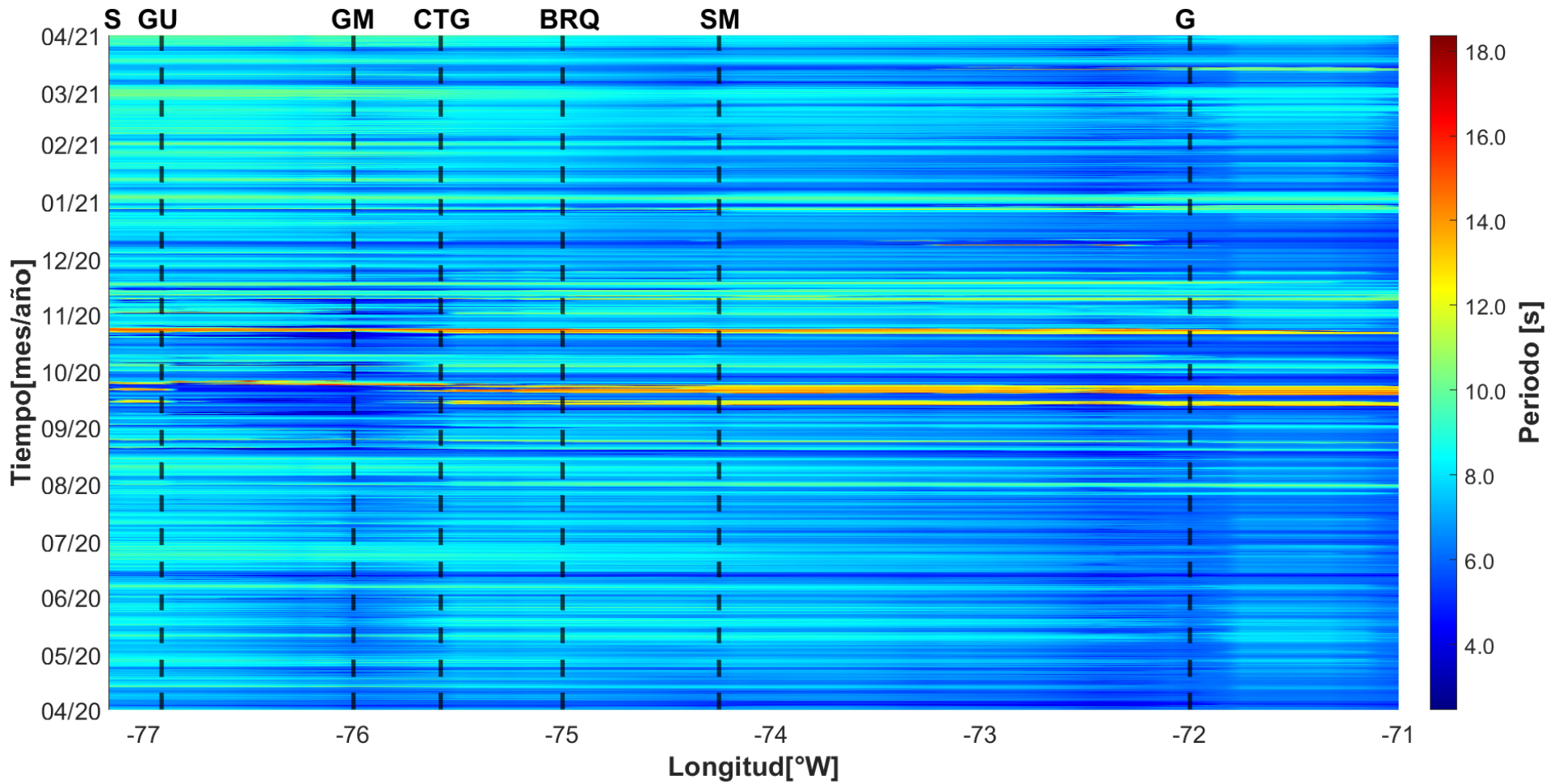
9. Anexos



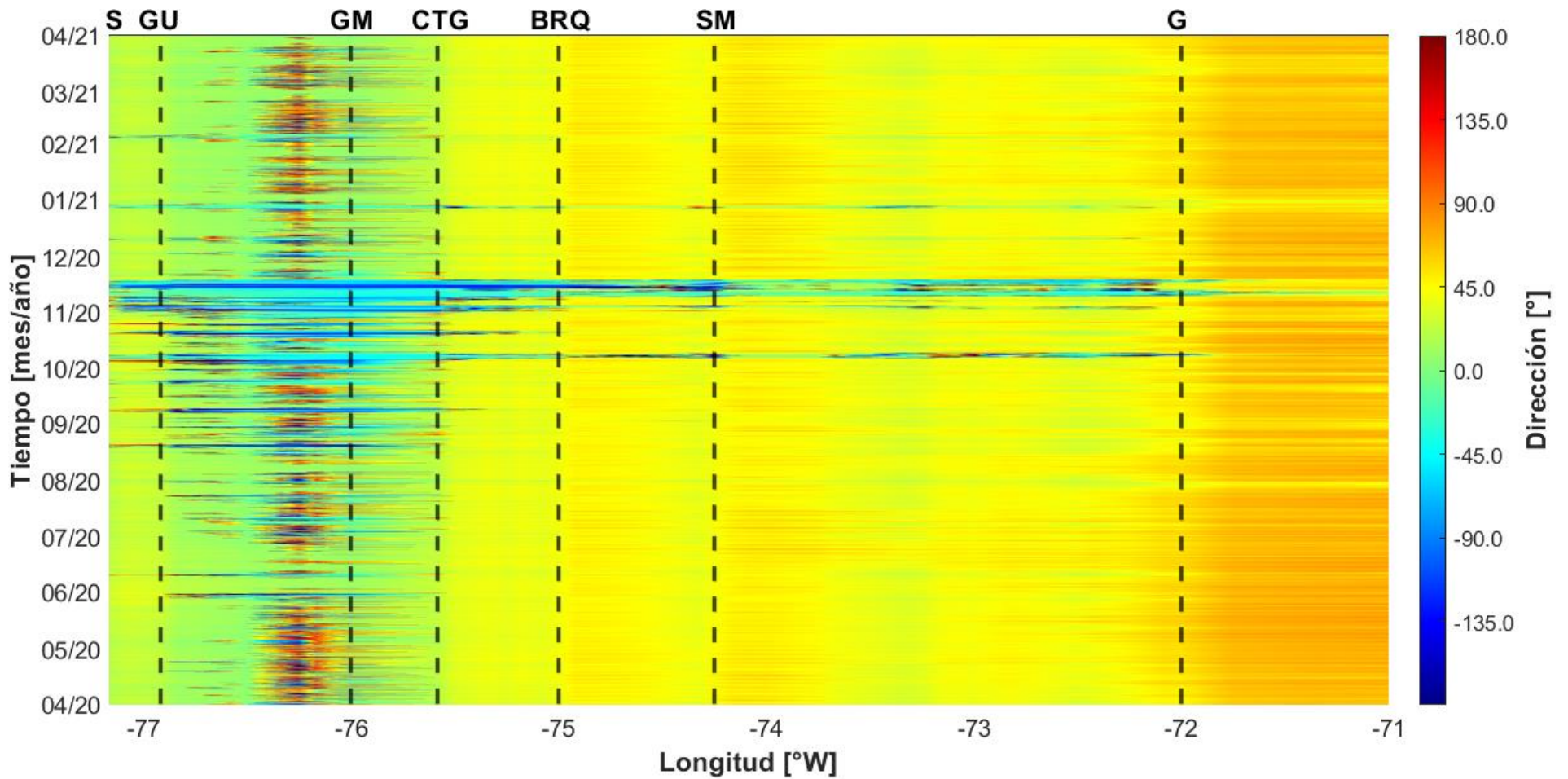
Anexo 1. Trayectoria de los ciclones Marco, Eta e Iota.



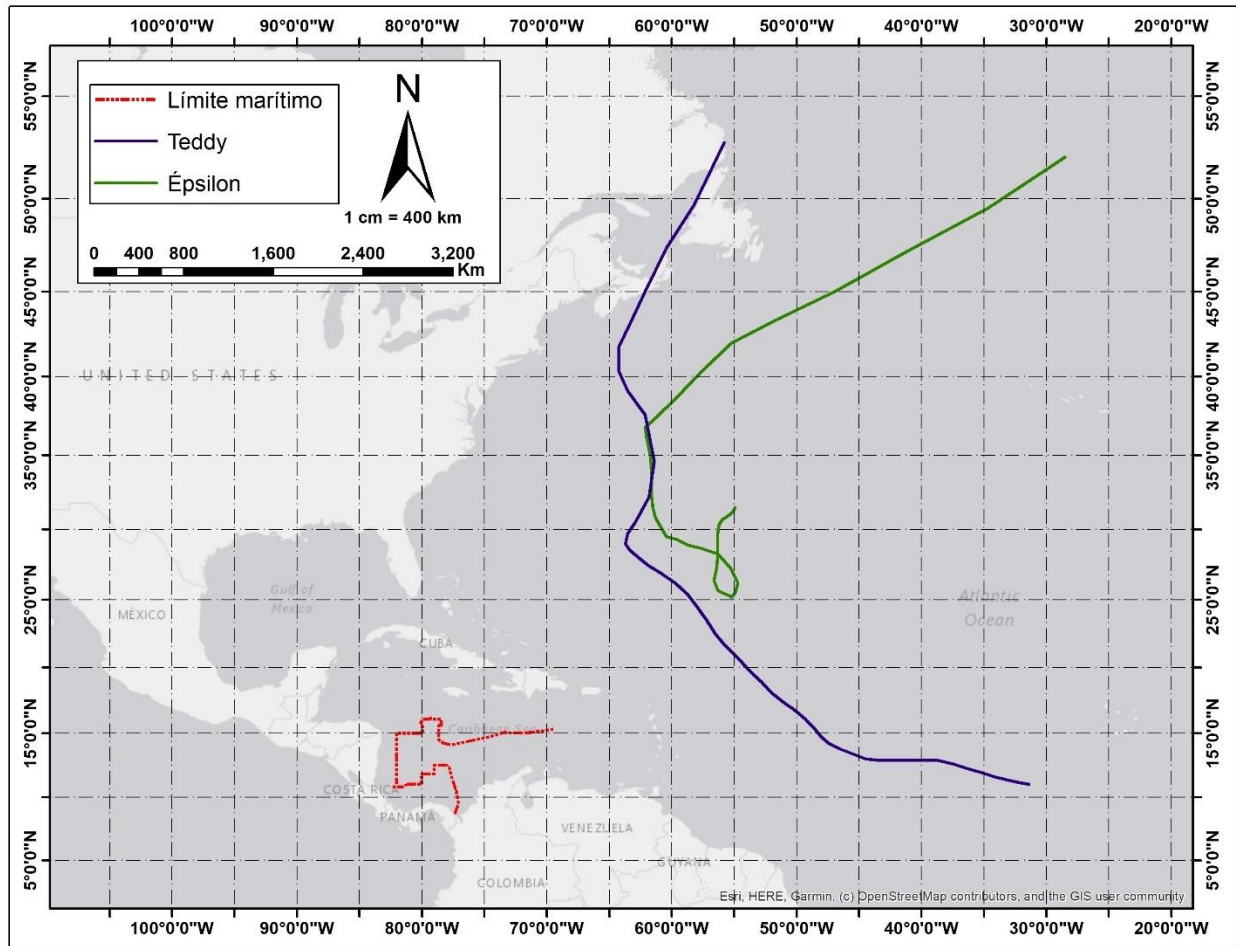
Anexo 2. Ubicación de las boyas de la NOAA en el mar Caribe.



Anexo 3. Diagrama tipo Howmoller para el periodo del oleaje a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).



Anexo 4. Diagrama tipo Howmöller para la dirección del oleaje a lo largo de la línea de costa del Caribe colombiano. Las líneas negras verticales corresponden a los sitios de interés: Sapzurro (S), golfo de Urabá (GU), golfo de Morrosquillo (GM), Cartagena (CTG), Barranquilla (BRQ), Santa Marta (SM), La Guajira (G).



Anexo 5. Trayectoria de los ciclones Teddy y Épsilon.

