



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL OLEAJE EN
EL CARIBE COLOMBIANO Y GOLFO DE URABÁ.**

Edwin Yamir Quintero Medina

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Turbo, Colombia

2020



**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL OLEAJE EN EL CARIBE
COLOMBIANO Y GOLFO DE URABÁ.**

Autor:

Edwin Yamir Quintero Medina

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

Ingeniero oceanográfico

Asesor:

Vladimir G. Toro Valencia

Ph.D. Oceanografía Física; Profesor Universidad de Antioquia, Sede Ciencias del Mar

Co-Asesor.

Héctor García Nava

Ph.D. Oceanografía Física; Profesor Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada
México

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Sede Ciencias del Mar.

Turbo, Colombia

2020

Agradezco a mis padres Hugo y Oneida por el acompañamiento, muchas gracias, sin ustedes esto no hubiese sido posible. Además, expreso mis agradecimientos a mis familiares, que de alguna u otra forma contribuyeron a mi formación profesional.

Muchas gracias al profe Vladimir G. Toro por su acompañamiento tanto lo académico profesional y personal. siempre estuvo muy atento en este proceso aportando sus conocimientos y consejos para lograr este objetivo.

Al profe Héctor García por su tiempo y estar siempre atento a las consultas para mejorar este trabajo muchas gracias

Agradecimiento a la Dirección General Marítima (Dimar) y a la Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (Corpouraba) por facilitar los datos para llevar a cabo este trabajo. Al compañero Sergio por facilitar los datos de su modelo muchas gracias

A las personas presentes en la Sede Ciencias del Mar por la prestación de sus servicios, su buena atención y disposición a colaborar, gracias.

A mis compañeros y profesores de la universidad muchas gracias por los momentos vividos y el apoyo realizado a largo de esta travesía.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1.2. Objetivos	5
1.2.3 Objetivos Específicos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
3. METODOLOGÍA	10
4. RESULTADOS.....	15
4.1 Caracterización de los parámetros integrales.	15
4.2. Cálculo de distancias y lugar de origen.	18
5. CONCLUSIONES	30
6. TRABAJO FUTURO	31
6. REFERENCIAS.....	32
ANEXOS	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de las boyas utilizadas.....	36
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las diferentes ondas oceánicas. Modificado de Garrison (2011).	6
Figura 2. Geometría de una ola. Modificado de Pinet (2009)	7
Figura 3. Zona de estudio, mar Caribe. En puntos negros se ubican las boyas que serán utilizadas (ver Anexo, Tabla 1).....	10
Figura 4. Batimetría del golfo de Urabá, profundidades en valores positivos. Tomado de Molina (2014)	11
Figura 5. Ejemplo de un evento del 31 de diciembre de 2015 hasta el 03 de enero de 2016, seleccionado para el análisis de origen y tiempo de arribo.	13
Figura 6. Relación entre H_s y T_p , H_s con intervalo de 0.25 m, T_p tiene intervalo de 1 s.	15
Figura 7. Direcciones del oleaje en las diferentes boyas desde 18 de julio de 2015 a las 11:41 hasta el 06 de diciembre de 2016 a las 21:00 horas.	16
Figura 8. Registro de T_p de las boyas 42056, 42057, 42058, 42059 y Virtual 1. Señalando los eventos analizados con la teoría lineal.	19
Figura 9. Registro de T_p de las boyas Barranquilla, Virtual 2, Virtual 3, EGolfo y Akuará, señalando los eventos analizados con la teoría lineal.	19
Figura 10. Registro de H_s de las boyas 42056, 42057, 42058, 42059 y Virtual 1, señalados los eventos analizados con la teoría lineal.	20
Figura 11. Registro de H_s de las boyas Barranquilla, Virtual 3, Virtual 2, EGolfo, y Akuará, señalados los eventos analizados con la teoría lineal.	20
Figura 12. Evento asociado al paso de la Tormenta Tropical Erika (2015).	21
Figura 13. Campo de viento (m/s) correspondientes al 29 de agosto de 2015 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	22
Figura 14. Campo de viento (m/s) correspondientes al 29 de agosto de 2015 a las 18 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	22
Figura 15. Evento asociado al paso del Huracán Earl (2016).	23
Figura 16. Campo de viento (m/s) correspondientes al 01 de agosto de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	24

Figura 17. Campo de viento (m/s) correspondientes al 01 de agosto de 2016 a las 18 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	24
Figura 18. Evento asociado al paso del Huracán Matthew (2016).	25
Figura 19. Campo de viento (m/s) correspondientes al 04 de octubre de 2016 a las 06 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	26
Figura 20. Campo de viento (m/s) correspondientes al 04 de octubre de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	26
Figura 21. Evento asociado a vientos intensos en el exterior del mar Caribe.	27
Figura 22. Campo de viento (m/s) correspondientes a el 13 de octubre del 2016 a las 06 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	28
Figura 23. Campo de viento (m/s) correspondientes a el 14 de octubre de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).....	28
Figura 24. La temporada oficial de huracanes para la Cuenca Atlántica (Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México) es del 1 de junio al 30 de noviembre. Como se ve en el gráfico anterior, el pico de la temporada es desde mediados de agosto hasta finales de octubre. Sin embargo, los huracanes mortales pueden ocurrir en cualquier momento durante la temporada de huracanes. Fuente https://www.nhc.noaa.gov/climo/#cp100	35

RESUMEN

El oleaje del Caribe Colombiano y del golfo de Urabá tiene variabilidad espacial relacionada con las épocas del año y los fenómenos naturales que suceden en ese lugar. En este trabajo se busca avanzar en el entendimiento de esta variabilidad mediante el análisis de datos *in situ* de boyas administradas por la NOAA, DIMAR, y Corpouraba, así como de boyas virtuales asociadas a salidas del modelo Wave WatchTM III. Se analizó la distribución conjunta entre la altura significativa del oleaje y la frecuencia asociada al pico espectral. Se utilizó la teoría lineal de Airy para calcular el origen y tiempo de viaje del oleaje que se genera en el Caribe y que llega a la entrada del golfo de Urabá. Estos cálculos se corroboraron con campos de viento a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar del reanálisis ERA-INTERIM. Se encontró que, en la parte norte del golfo de Urabá, el oleaje con mayores alturas significantes es generado principalmente por los vientos alisios, y que el oleaje de periodo más largo es producido tormentas lejanas. Si bien, los mayores valores de altura significativa en el Caribe colombiano son generados por los huracanes, la mayoría de eventos que sobrepasan un valor de 3 metros están asociados a eventos generados por los vientos alisios. En general el periodo asociado al pico espectral del oleaje en el Caribe tiene entre 6 y 7 segundos con un leve aumento en las afueras del golfo. Los datos muestran que la zona del golfo de Urabá suele ser la menos afectada por los eventos extremos de oleaje comparado con la costa Caribe colombiana.

Palabras clave. Golfo de Urabá, Mar Caribe, Altura significativa, Periodo asociado al pico espectral, Boyas.

ABSTRACT

The waves at the Colombian Caribbean Sea and the Gulf of Uraba have spatial variability related to seasonal changes and the natural phenomena that occur in this region. This work aim to advance in the understanding of this variability through the analysis of *in situ* data from buoys from NOAA, DIMAR, and Corpouraba, as well as virtual buoys from outputs of an implementation of the Wave WatchTM III model. The joint distribution of,significant wave height and peak frequency was analyzed. Airy's linear theory was used to calculate the origin and travel time of the waves that are generated in the Caribbean Sea and that reach the mouth to the Gulf of Urabá. These calculations were corroborated using wind fields at 10 meters height from the ERA-INTERIM reanalysis. It was found that the highest wave at the northern part of the Gulf of Urabá are mainly influenced by the trade winds, and that the largest peak periods are produced by distant storms. Although the highest waves at the Colombian Caribbean Sea are generated by hurricanes, most events that exceeded a value of 3 meters were associated with events generated by trade winds. In general, the peak period values in the Caribbean has between 6 and 7 seconds with a slight increase at the outskirts of the Gulf. The data showed that the area of the Gulf of Uraba is usually the least affected by extreme wave events compared to the Colombian Caribbean coast.

Keywords. Gulf of Urabá, Caribbean Sea, significant wave height, peak period, wave buoys.

INTRODUCCIÓN

Entender los procesos asociados a la generación y desarrollo del oleaje es de gran importancia ya que permite mejorar los procesos de planificación y gestión marino-costera. De manera específica el oleaje es importante en aspectos como la navegabilidad, la pesca, el diseño de estructuras portuarias y el desarrollo de industria turística. Además, el oleaje puede tener influencia en fenómenos como la erosión, sedimentación e inundación de la zona costera, convirtiéndose en una posible amenaza para las personas y especies que habitan esta zona. Por lo que, el desconocimiento de sus características puede aumentar el riesgo de la población y de los ecosistemas, así como generar una mala gestión del entorno costero (Osorio *et al.*, 2009).

En Colombia, el oleaje es un fenómeno importante ya que tiene acción sobre una línea de costa que tiene una extensión aproximada de 1.600 Km y 2.200 Km en el Caribe y en Pacífico, respectivamente (Díaz *et al.*, 2007). En el caso específico de Antioquia y Córdoba, el oleaje ha sido un factor determinante en los procesos de erosión y destrucción de hábitats costeros (Posada y Henao 2008.) Debido a la extensión de la línea de costa del Caribe Colombiano, y a los problemas que se presentan en la actualidad es necesario mejorar el conocimiento sobre el origen y evolución del oleaje. De esta manera aportar al conocimiento sobre el comportamiento del oleaje dentro del Caribe y de manera específica en el Golfo de Urabá.

Entre los primeros estudios de oleaje que se hicieron en el mar Caribe Colombiano, Lonin *et al.* (1996) implementó el modelo Netherland Wave Model (NedWAM). Entre los inconvenientes que tuvo este estudio fue el acceso a información del campo vientos, además de la incertidumbre de las condiciones de frontera del Océano Atlántico. Más adelante, Osorio *et al.* (2009) implementó el modelo Wave WatchTM III (WWIIITM) forzado con campos de vientos y utilizando datos de oleaje satelitales, visuales e *in situ* para calibrar/validar el modelo. Estos autores encontraron que entre los 13° y 15° de latitud norte y los 72° y 80° de longitud oeste se presentan los valores promedio de altura significativa del oleaje (Hs) más altos del Caribe colombiano.

Debido a la escasa presencia de boyas que miden oleaje en el Caribe, Ortega *et al.* (2010), sugiere que los datos sintéticos de oleaje que producen los modelos son una herramienta muy útil para conocer el régimen medio de oleaje en cualquier lugar del Caribe. Siguiendo esta sugerencia, Peláez *et al.* (2016) a partir de modelación numérica construyó series sintéticas de oleaje a lo largo de la costa caribe colombiana. Estos autores encontraron que los mayores valores de Hs cercanos

a la línea de costa se presentan a finales e inicios de año debido a los vientos alisios y en menor medida a eventos extremos como los huracanes. En general, estos estudios sugieren que los valores de Hs modelados y medidos son similares, sin embargo, estos primeros presentan una subestimación de los valores durante eventos extremos.

El Caribe, aunque no es un mar completamente cerrado, está rodeado por una cadena de islas llamadas Antillas mayores y menores. Estas islas son fundamentales para la influencia del oleaje del Océano Atlántico en este lugar. De acuerdo con Fett y Rabe (1976) las Antillas producen una disminución de la Hs y del periodo asociado al pico espectral (T_p) cuando el oleaje pasa del Atlántico hacia el Caribe. En este mismo sentido Londoño, (2018) encontró que la presencia de las islas disminuye la energía del oleaje (principalmente swell) que llega desde Atlántico. Esta autora además encontró que el oleaje que ingresa al Caribe se dirige en promedio hacia el oeste, y en su camino va disipando o aumentando energía de acuerdo con el campo de vientos del mar Caribe.

Respecto al golfo de Urabá Osorio *et al.* (2010) caracterizaron su oleaje por medio de la implementación del modelo Simulating Waves Nearshore (SWAN). Para esto forzaron el modelo con campos de vientos y realizaron la validación del mismo con datos de tres sensores de presión. Los resultados sugieren un buen ajuste de los datos medidos y los modelados, pero errores en cuanto a valores mínimos y máximos de Hs. Además, encontraron que en el norte de golfo predomina el oleaje tipo swell mientras que en el sur (bahía Colombia) predomina el oleaje local. En cuanto a bahía Colombia, Alvares *et al.* (2012) implementaron el modelo SWAN y el modelo Sistema de Modelado Costero (SMC), con el fin de estudiar el comportamiento de las corrientes y su influencia en el oleaje. De manera particular estudiaron las corrientes provocadas por la rotura de las olas en la desembocadura del río León. Estos autores encontraron que el oleaje que viene de Caribe tiene muy poca influencia en régimen medio de oleaje de esta zona. En cuanto a la zona norte, Orejarena *et al.* (2013) encontraron valores de Hs mayores de 2 metros para los meses de enero, a marzo, T_p entre 6 y 7s, con una correlación en el incremento/disminución de los valores de estos parámetros respecto a la época seca/lluvia, respectivamente. Más recientemente Padilla (2018) utilizando el modelo WWIIITM confirmó que, el swell domina el campo de oleaje en la entrada del Golfo mientras que, la parte central y sur, se presenta principalmente oleaje local. A

pesar de estos estudios, en la caracterización de eventos extremos es necesario conocer más precisamente el origen del oleaje, así como el tiempo de viaje desde ese sitio hasta la línea de costa.

Algunos trabajos han realizado investigación para determinar el origen de las tormentas que ocasionan el oleaje. De manera particular Barber y Urcell (1948) a partir de mediciones de oleaje con un sensor de presión instalado en Land's End (Inglaterra) y campos sinópticos del viento determinaron que el oleaje que llegó a la línea de costa, fue generado por una depresión en el Atlántico Norte y recorrió una distancia de 2.172 Km. También identificaron un oleaje proveniente de Cape Horn a una distancia de 11.112 Km. La aproximación usada por estos autores fue siguiendo la teoría lineal del oleaje de Airy (1841). Siguiendo la misma línea de investigación Munk *et al.*, (1963) analizaron mediciones diarias del oleaje en la isla San Clemente (California), encontrando que la mayoría de oleaje entre junio y septiembre proviene de la sección Nueva Zelanda, Australia, Antártida y el mar de Ross, aunque también hay un oleaje proveniente del Océano Índico. En las mediciones de octubre se descubrió que la mayor parte del oleaje proviene del Pacífico Norte, esto debido a que la Antártida aumenta su área congelada y las islas del Pacífico Sur se comportan como obstáculos que disminuyen la energía del espectro de frecuencia del oleaje. Por otro lado Snodgrass *et al.*, (1966) realizaron una investigación en el Pacífico donde fueron instalados 6 sitios de medición entre Nueva Zelanda y Alaska. Se encontró que el oleaje tipo swell tiene la capacidad de viajar desde la Antártida hasta Alaska atravesando todo el Pacífico. Es así como fue posible detectar swell proveniente desde el Océano Índico.

En trabajos más recientes, a partir de modelación numérica Alves (2006) determinó la disipación de la energía del swell debido a su tránsito y analizó el origen del oleaje generado por tormentas lejanas. De otro lado Cervantes (2009) determinó el origen y tiempo de arribo de oleaje swell en el Pacífico mexicano. Para esto utilizó mediciones de 3 perfiladores acústicos Doppler instalados en la zona norte del Golfo de Tehuantepec desde el 24 de febrero hasta finales de mayo de 2005. Este autor encontró que el oleaje registrado en México provenía del Mar de Ross, ubicado al sureste y sur de Nueva Zelanda, y de eventos producidos frente a las costas de Chile. Para esto utilizó la teoría lineal e hizo la comprobación con los campos de vientos sobre el Pacífico Sur. En general, los trabajos realizados hasta ahora han analizado el desplazamiento del swell en el Pacífico y en Atlántico, pero no en zonas más reducidas como el Caribe.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en el presente trabajo se espera determinar la variabilidad del oleaje que viaja por el mar Caribe Colombiano, y adicionalmente calcular para algunos eventos extremos el sitio de origen del oleaje dentro del mar Caribe y su tiempo de viaje hasta la zona norte del golfo de Urabá. Para esto se utilizarán datos de oleaje de boyas in situ (NOAA, Corpourabá y DIMAR) y boyas virtuales generadas a partir de modelación numérica.

Con base en la caracterización del oleaje se espera establecer si es posible utilizar la teoría lineal del oleaje en el Caribe Colombiano, con el fin de identificar el origen y distancia a la entrada del golfo de Urabá. Partimos del hecho que la teoría lineal puede ser utilizada para este fin, inclusive en eventos producidos por huracanes y por los vientos alisios. Esta información es importante para avanzar en el entendimiento de los procesos de generación y evolución del oleaje dentro del mar Caribe, además se espera que esta información pueda ser utilizada por quienes hacen estudios en este ámbito.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar las características del oleaje en el Caribe Colombiano y golfo de Urabá, así como el tiempo y distancia de la zona de generación a partir de información medida y modelada.

1.2.3 Objetivos Específicos

- Caracterizar los parámetros integrales del oleaje medido por boyas y obtenido a partir de salidas de un modelo numérico en el Caribe Colombiano y Golfo de Urabá.
- Calcular el tiempo y distancia de la zona de generación de eventos extremos utilizando la teoría lineal del oleaje.

2. MARCO TEÓRICO

El oleaje se define como las ondas causadas por la acción del viento sobre la superficie del océano, y que, al disiparse, transmiten energía al interior del océano (Garrison, 2011). Las ondas que se encuentran en el mar se pueden clasificar de acuerdo a su periodo, fuerza restauradora y fuerza perturbadora (figura 1). En nuestro caso, solo nos referiremos a las olas causadas por el viento, las cuales tienen periodos entre 1 y 30 s y cuya fuerza restauradora es la gravedad. Las olas se producen en una zona llamada *fetch*, una vez las olas salen de su sitio de generación viajan por océano hasta llegar a la línea de costa donde en general se disipa toda su energía (Universidad de Cantabria *et al.*, 2000).

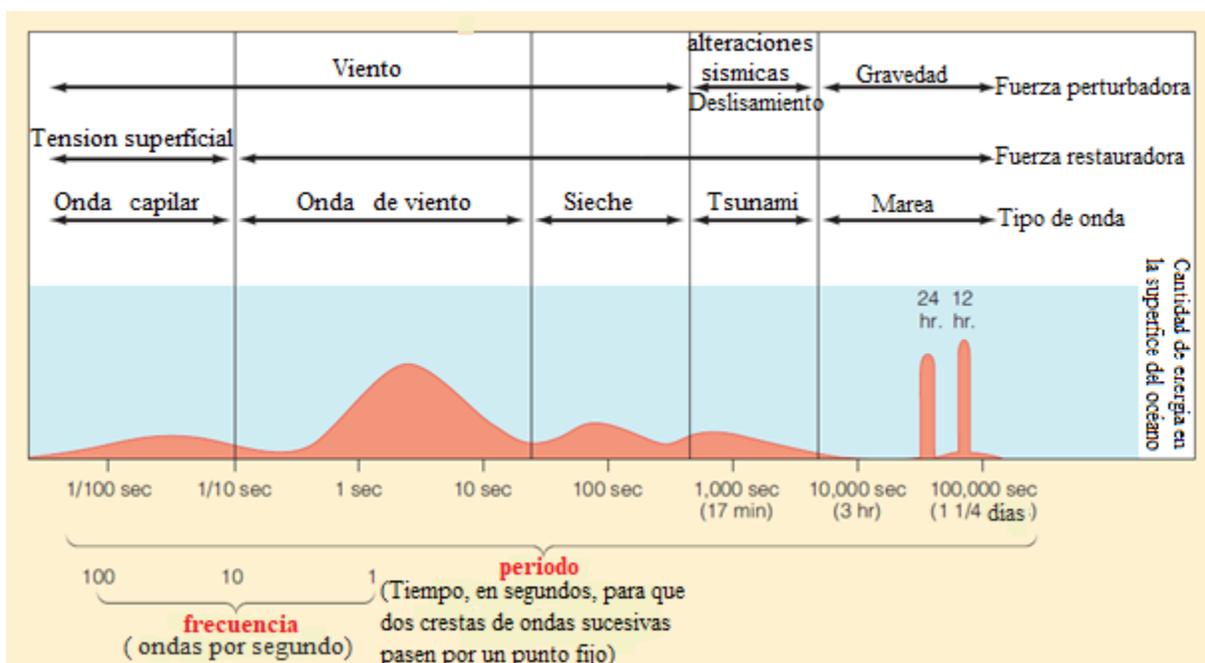


Figura 1. Clasificación de las diferentes ondas oceánicas. Modificado de Garrison (2011).

Una ola está compuesta de las siguientes partes (ver figura 2):

- *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 sucesiva

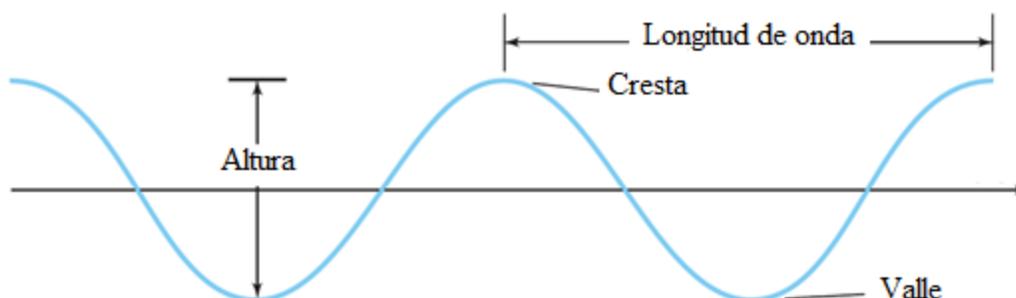


Figura 2. Geometría de una ola. Modificado de Pinet (2009)

La energía del oleaje depende principalmente de tres factores, la intensidad viento, la duración del viento y la longitud del área donde sopla el viento, el *fetch* (Pinet, 2009). La representación más básica de las características del oleaje se hace por medio de los parámetros integrales, en donde se pueden definir las siguientes variables:

- *Altura significativa* (H_s): puede ser calculada como el promedio del tercio de olas más altas dentro de una medición de oleaje. A partir del espectro en frecuencia o dirección se suele definir mediante la siguiente ecuación:

$$H_{m0} = 4.005\sqrt{M_0} \quad (1)$$

donde M_0 es el momento de orden cero, que equivale al área bajo la curva del espectro en frecuencia o dirección del oleaje.

- *Periodo asociado al pico del espectro* (T_p): es el periodo que se puede asociar al valor más alto de energía en el espectro de frecuencia o dirección.
- *Dirección promedio del oleaje* (Dir): es la dirección de la mayor cantidad de energía asociado al espectro direccional.

Según Rosales (1998), el oleaje puede ser clasificado de acuerdo a su origen:

- *Swell (oleaje de mar de fondo)*: es el oleaje que ha salido de zona de generación y generalmente está bien alineado, con crestas y valles bien formados. En algunos casos es posible apreciar a simple vista la dirección predominante.
- *Wind sea (oleaje local)*: oleaje que aún está en la zona de generación (*fetch*). Se caracteriza por ser caótico, debido a que no tiene una dirección bien definida además de mostrar altas pendientes en sus crestas

Respecto a la generación del oleaje, este es un proceso aleatorio que depende principalmente del campo de viento. Para la determinación del origen a partir de datos en un sitio se hacen algunas aproximaciones basados en la teoría del oleaje de Airy (1841), la cual supone principalmente que las olas son lineales y de pequeña amplitud con relación a su longitud de onda. Otras consideraciones que hace esta teoría son:

- Las ondas son bidimensionales.
- Las ondas no evolucionan en el tiempo y el espacio.
- El fluido es incompresible.
- Los efectos de la viscosidad, tensión superficial y turbulencia son despreciables.

Con base a la Teoría del oleaje de Airy, se propone la siguiente ecuación que representa la dispersión de las olas, la cual relaciona la frecuencia angular (ω) con el número de onda (k)

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2)$$

donde g es la constante de aceleración gravitatoria, k es el número de onda definido como $\frac{2\pi}{L}$, L es la longitud de onda y d la profundidad. De otro lado la rapidez de la onda o celeridad de fase (C) está dada por:

$$C = \frac{L}{T} \quad (3)$$

donde a partir de la ecuación (2) es posible obtener a C en función de ω y k :

$$C = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

La energía del oleaje viaja con la velocidad del grupo que se define como $C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ en aguas profundas, utilizando la relación de dispersión, se reduce a

$$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{2\omega}{k} \quad (5)$$

De la ecuación (3), podemos definir la velocidad en función de la distancia desde la zona de generación a el sitio de medición (X) y el tiempo de la siguiente manera:

$$C_g = \frac{X}{(t-t_0)} \quad (6)$$

donde t es el tiempo de llegada y t_0 es el tiempo inicial, en el que se generó el oleaje, (Cervantes, 2009). Tomando (Cg) en función de la frecuencia angular encontramos que al igualar las ecuaciones (5) y (6) obtenemos:

$$t = \frac{2X\omega}{g} + t_0. \quad (7)$$

A partir de la ecuación (7) se puede localizar las tormentas que generan el oleaje que arriba a un sitio determinado, utilizando series de tiempo del periodo asociado al pico espectral y su frecuencia angular. (LeBlond y Mysak 1978) explican que se debe hacer un ajuste lineal de la frecuencia angular ω contra t (tiempo de registro de las olas), para la cual el intercepto es el tiempo de origen del oleaje y la pendiente equivale a la distancia del lugar de origen, que es la forma como se harán los cálculos para hallar orígenes de tormentas. Este es el mismo método utilizado por (Snodgrass *et al.*, 1966) y (Cervantes, 2009), para encontrar el origen del oleaje que llega a Alaska y Golfo de Tehuantepec, respectivamente.

3. METODOLOGÍA

El mar Caribe es un mar semicerrado limitado hacia el oeste por América central y al sur por América del sur. Hacia el norte se encuentra delimitado por las llamadas Antillas mayores y hacia el este se encuentra limitado por las Antillas menores (Fig. 2). De otro lado, el Golfo de Urabá se encuentra en la zona suroeste del mar caribe, limitado por cabo Tiburón (frontera entre Panamá y Colombia) y punta Arboletes (frontera entre el departamento de Antioquia y Córdoba) con una franja litoral de 512 km (Corpourabá, 2012) (Fig. 3). El golfo posee una distancia sur-norte promedio de 80 km y un ancho que varía entre 10 y los 50 km y tiene una profundidad promedio de 25m y máximas en la parte de norte de 70m (Fig. 4).

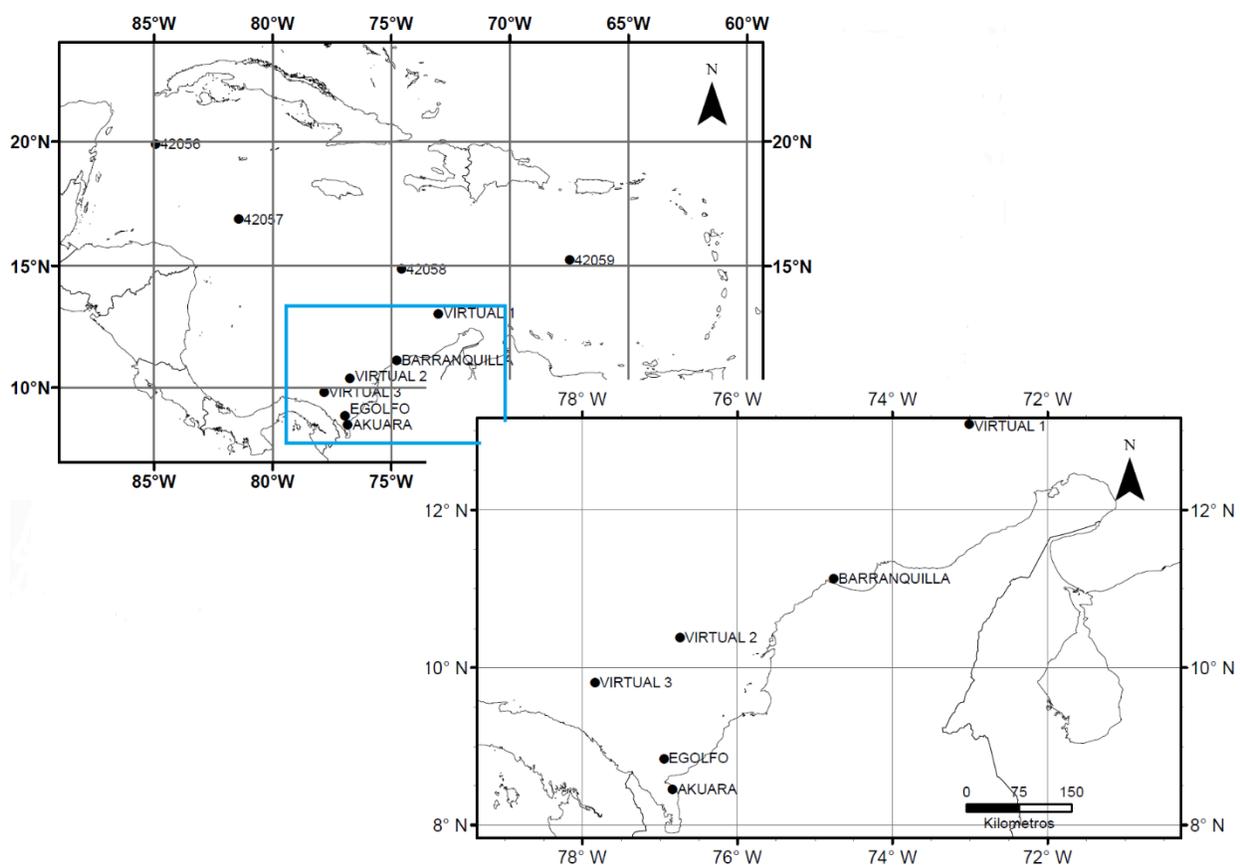


Figura 3. Zona de estudio, mar Caribe. En puntos negros se ubican las boyas que serán utilizadas (ver Anexo, Tabla 1).

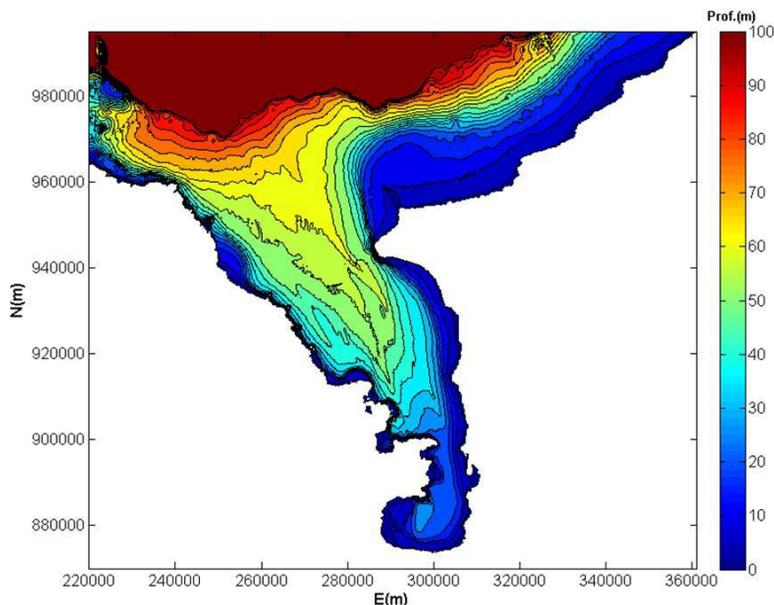


Figura 4. Batimetría del golfo de Urabá, profundidades en valores positivos. Tomado de Molina (2014)

El Caribe es un mar que, por estar ubicado cerca del ecuador, no tiene grandes cambios de temperatura en comparación a las zonas templadas. Sin embargo, se evidencian dos temporadas climáticas en esta región: seca y húmeda, influenciadas principalmente por la Zona de Convergencia Intertropical (Andrade, 2015). En el Golfo de Urabá, la época húmeda va de abril a noviembre, mientras que la temporada seca va de diciembre a marzo. En el golfo de Urabá la marea se considera diurna mixta, con un rango promedio de ± 0.5 m (García-Valencia, C. 2007).

Según datos de la NOAA en el Atlántico, la temporada oficial de huracanes va del 01 de junio al 30 de noviembre, pero el pico de la temporada para el Atlántico incluyendo el Caribe y Golfo de México va desde mediados de agosto hasta finales de octubre (ver Anexo, Figura 24). De acuerdo con Bernal *et al.*, (2016), sesenta tormentas han pasado por el Caribe colombiano entre 1900 y 2010, encontrando que entre los huracanes que han afectado fuertemente de manera importante la costa Caribe colombiana se encuentran Joan (octubre de 1988), Mitch (noviembre de 1998) y Lenny (noviembre de 1999). Sin embargo, todo el Caribe se ve afectado por la época de vientos alisios, entre diciembre y marzo, los cuales generan oleaje energético durante un periodo extenso.

En general en el golfo de Urabá, el oleaje presenta frecuencias entre 0.8 Hz y 0.2 Hz y alturas promedio de 1.1 m. Dentro del golfo, debido a su morfología, el swell pierde importancia y domina

el oleaje local con alturas promedio de 0.3 m, siendo el oleaje más energético el de la época de seca (Padilla, 2018).

Una parte de los datos de oleaje (parámetros integrales) utilizados en este trabajo fueron obtenidos desde las boyas de la NOAA <https://www.ndbc.noaa.gov/> de manera específica la información relacionada con las boyas 42056, 42057, 42058 y 42059. También se utilizaron datos de dos boyas de la DIMAR en el Caribe, ubicadas a 28 km de punta Caribaná en las afueras del Golfo de Urabá (EGolfo) y la otra en frente de Barranquilla. Dentro del Golfo de Urabá se contó con los registros de oleaje de la boya Akuará, administrada por Corpourabá, la cual se encuentra al nor-oeste del municipio de Necoclí, esta solo mide valores de Hs y Tp. Por último, se cuenta con series de tiempo de parámetros integrales de salidas del modelo WaveWatchIIITM obtenidos del proyecto de “Erosión Costera”. Se cuenta con información en tres sitios del Caribe denominados Virtual 1, Virtual 2 y Virtual 3.

El periodo de medición analizado va desde el 18 de julio de 2015 hasta el 06 de diciembre de 2016. Este periodo se escogió con base en la serie de tiempo de la boya Akuará. En este intervalo de tiempo las boyas de DIMAR presentaron discontinuidad en mediciones, debido a que tiene errores en su medición y temporadas dedicadas al mantenimiento de la mismas.

Luego de escoger el periodo de mediciones se hizo un control de calidad sobre los datos medidos por las boyas de DIMAR. Entre otras cosas, y teniendo en cuenta las referencias revisadas, se tuvieron como criterios de descarte de los datos medidos de manera simultánea (Hs, Tp y Dir), los siguientes:

- EGolfo: Hs mayores a 5 m; Barranquilla: Hs mayores a 7 m
- EGolfo, Barranquilla: Tp mayores a 20 segundos

En el caso de las boyas de la NOAA, y de nuevo teniendo en cuenta los valores de las referencias revisadas, se descartaron las mediciones de acuerdo con los siguientes valores Hs mayores a 10 m y Tp mayores a 22 segundos. En el caso de la boya 42057 solo se contó con datos medidos de Dir hasta el 14 de junio de 2016 y datos de Tp y Hs hasta el 28 de junio de 2016. Las demás boyas de la NOAA a pesar de tener algunos datos faltantes, tienen en general una buena continuidad. Es de notar que los registros de los datos modelados, fueron continuos en el tiempo y no fue necesario un control de calidad sobre los mismos.

Luego de hacer el control de calidad de los datos medidos, se realizó la caracterización de los parámetros integrales, mediante el graficas de barras, para observar los porcentajes de Hs y Tp de acuerdo a la magnitud, se hicieron graficas de la dirección y graficas de probabilidad conjunta con el fin de observar la relación entre Hs y Tp.

Luego, se procedió a realizar búsquedas de eventos que permitirán la definición del origen y tiempo de arribo del oleaje (figura 5). Para esto se seleccionaron solo de la boya EGolfo eventos enmarcados en la época de huracanes (junio a noviembre) y en la época de alisios (diciembre a marzo). Estos eventos se separaron del resto de la serie y se calculó la frecuencia angular (ω) a partir de Tp como $\omega = 2\pi/Tp$ (Rad/s). Luego se realizaron gráficos de ω en función de tiempo. Adicionalmente se graficaron los campos de vientos de las horas (días) anteriores al registro de los datos en la boya.

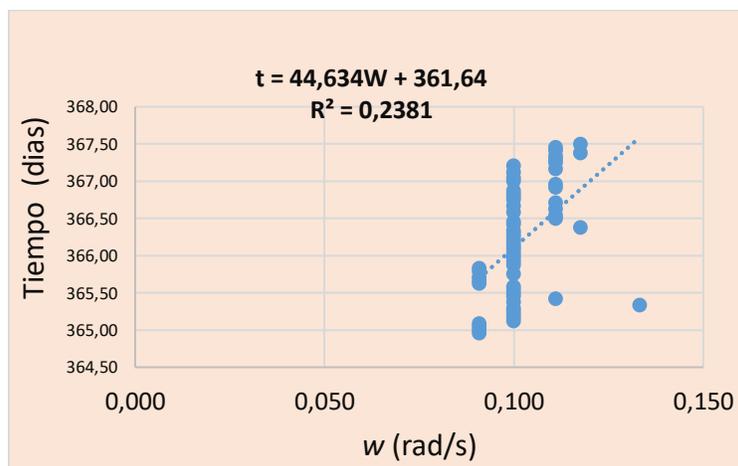


Figura 5. Ejemplo de un evento del 31 de diciembre de 2015 hasta el 03 de enero de 2016, seleccionado para el análisis de origen y tiempo de arribo.

Luego se realizó una regresión lineal sobre los datos gráficos, y con base en la ecuación (7) se propuso una expresión para el tiempo de arribo (t_0)

$$t = m\omega + t_0 \quad (8)$$

donde m es la pendiente de la regresión. La forma de las ecuaciones (7) y (8) coincide con lo propuesto por Barber y Urcell (1948), Snodgrass *et al.*, (1966) y Cervantes (2009), los cuales

proponen que la dispersión del oleaje se puede representar por medio de una ecuación lineal bajo ciertas condiciones.

Haciendo un análisis dimensional de la ecuación (8) nos encontramos que

$$[T] = [m] \left[\frac{1}{T} \right] + [T]$$

lo cual implica m tiene dimensión de $[T^2]$, por lo tanto de acuerdo con las ecuaciones (7) y (8) m sería la siguiente expresión:

$$m = \frac{2X}{g} \quad (9)$$

De la (Figura 5) observamos que $m = 44.634$, y que $t_0 = 361.64$ días, que equivale a el día 27 de diciembre de 2015 a las 15,30 horas. Luego utilizando la ecuación (9) se pudo determinar $X = 18896$ Km. Teniendo como centro la boya EGolfo se traza una circunferencia con radio igual al valor de X con el fin de encontrar el origen del oleaje. Para confirmar el origen del oleaje se se utilizaron datos de viento del reanálisis de ERA-interim de una altura de 10 metros sobre el nivel del mar, Con una resolución espacial de 0.125 por 0.125 grados, y una resolución temporal de 6 horas descargados de <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/> y siendo graficados con Matlab.

En el caso de la (Figura 5), el valor de X se ubica principalmente sobre el Océano Índico y de acuerdo con los campos de viento sugieren que el posible origen del evento mostrado sean los vientos que soplaron durante esos días a la altura de la Guajira. Por lo tanto, el oleaje analizado es un tipo *wind sea* o oleaje local. A pesar que para este evento en particular la teoría lineal no mostró resultados adecuados, se encontraron otros eventos que se analizan en el apartado de resultados.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados más relevantes y los análisis asociados a los mismos. En primer lugar, se presentará los resultados asociados a la caracterización de los parámetros integrales del oleaje. Inicialmente se realizó la caracterización por separado entre la altura significativa del oleaje (H_s) y el periodo asociado al pico espectral (T_p). Sin embargo, para una mejor comprensión, se realizaron las gráficas de probabilidad conjunta entre H_s y T_p .

4.1 Caracterización de los parámetros integrales.

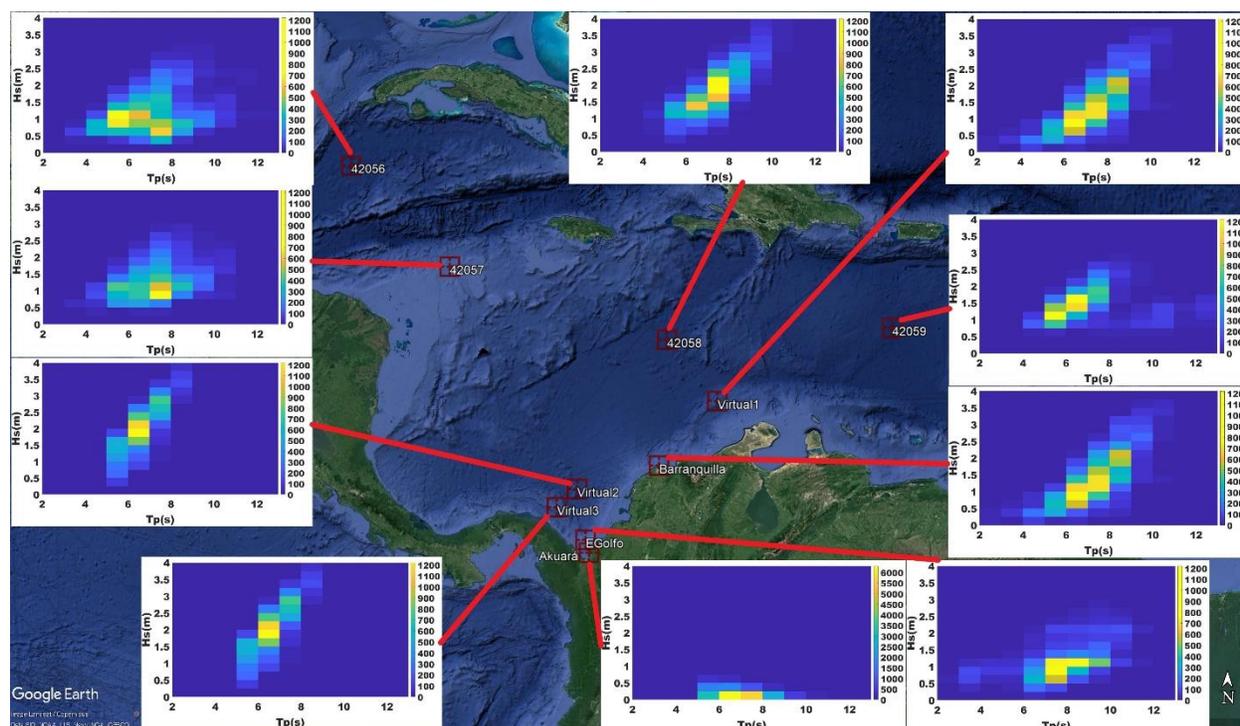


Figura 6. Relación entre H_s y T_p , H_s con intervalo de 0.25 m, T_p tiene intervalo de 1 s.

En la figura 6 se observan los gráficos de probabilidad conjunta de H_s y T_p y la ubicación espacial de la boya de medición asociada. En los datos asociado a la boya Akuará, se puede notar que esta posee H_s mucho menores que los demás sitios de medición, mostrando la mayor concentración de resultados entre 0 y 0.5 m. Tal situación posiblemente ocurre debido a que el oleaje que puede llegar directamente a la boya se encuentra modificado por punta Caribaná, lo cual haría que el oleaje tenga que girar para llegar a esta ubicación. Sin embargo, los valores de T_p que tiene son similares a los valores de las demás boyas.

Las boyas Virtual 1, Virtual 2, Virtual 3, Barranquilla, 42058 y 42059, muestran una relación H_s y T_p , similar para todas. En estas boyas se observan valores de H_s por encima de los 3 m, que de acuerdo a la ubicación de las boyas se produce en la zona central del Caribe Colombiano. Esto concuerda con el trabajo de Osorio (2009) donde se muestra los mayores valores de H_s en esta zona del Caribe. El máximo valor de H_s registrado por la boya EGolfo es 3.4 m ocasionado por vientos alisios. Los mayores H_s que se presentaron en las boyas 42058 y 42059 con valores de 8.43 y 9.25 ocurrieron en época de huracanes.

En términos generales las boyas 42056, 42057, 42058, Virtual 1, Virtual 2, Virtual 3, Barranquilla, Akuará tienen valores de T_p entre los 5 y 9 segundos. La boya 42059 presenta valores entre los 5 y 8 segundos, a pesar de tener el mayor número de periodos por encima de los 11 segundos. Por último, en la boya EGolfo se nota un aumento de la magnitud de T_p que esta entre los 6 y 10 segundos los mayores porcentajes. En general las boyas 42059, Akuará, Virtual 2, Virtual 3 presentan valores de T_p entre 6 y 7 segundos.

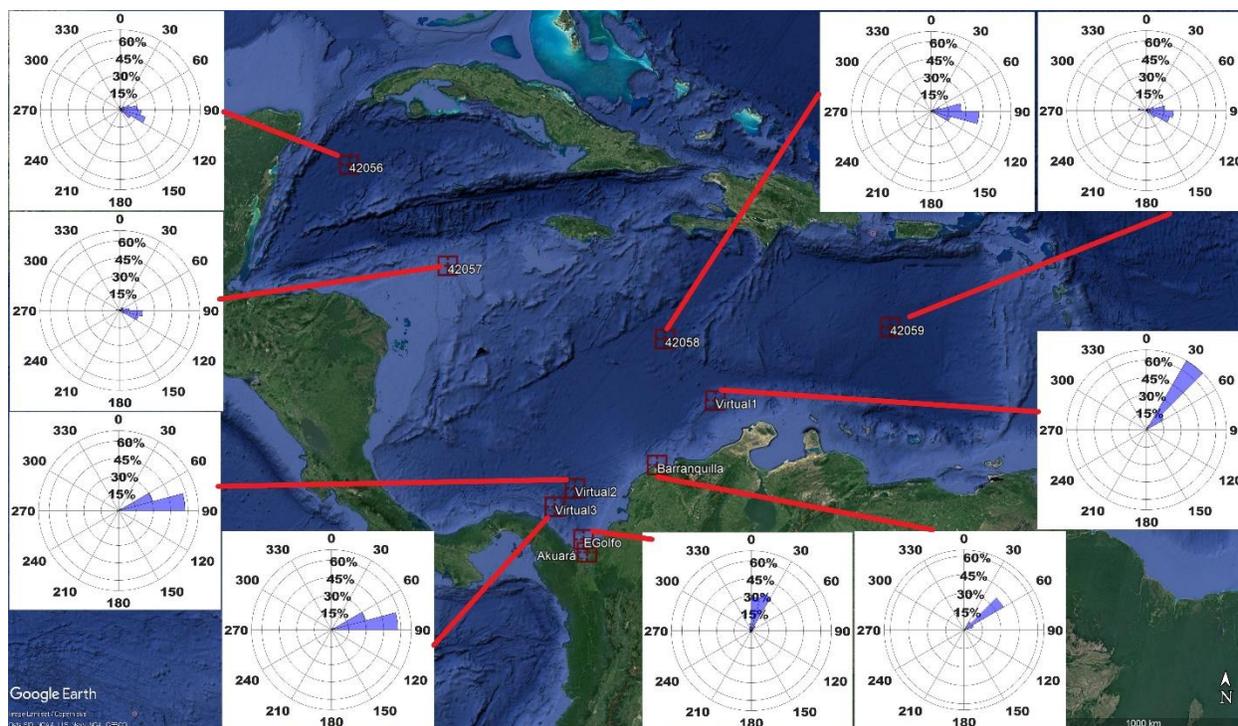


Figura 7. Direcciones del oleaje en las diferentes boyas desde 18 de julio de 2015 a las 11:41 hasta el 06 de diciembre de 2016 a las 21:00 horas.

En la figura 7 se observan los gráficos asociados a la estadística de la dirección del oleaje (de donde procede el oleaje) en cada una de las boyas analizadas. Se observa que para la boya 42059 el oleaje tiene una dirección entre 120 y 90 grados, un poco menos del 7% viene desde el centro del Caribe. En la boya 42058 las direcciones se distribuyen entre los 60 y 120 grados. Luego en las boyas Virtual 1 y Barranquilla se nota como el oleaje va cambiando de orientación, para distribuirse entre los 30 y 60 grados. Las boyas Virtual 2 y Virtual 3 tienen direcciones entre los 60 y 90 grados. Ya en la boya EGolfo el oleaje se reorienta con valores entre los 0 y 30 grados esto porque hacia el este y oeste de la posición de la boya no hay zonas donde se puedan generar oleaje.

Hacia el noreste del Caribe las boyas 42057 y 42056 muestran oleaje que viaja desde el suroeste de su posición, pero también presentan direcciones de oleaje provenientes del golfo de México en menor porcentaje. A pesar de existir oleaje que puede llegar de otras direcciones, se observa un porcentaje de oleaje que viaja desde las Antillas menores dirigiéndose hacia el oeste y luego distribuyéndose hacia el norte y el sur. Este comportamiento es similar al descrito por Londoño (2018).

En el este del Caribe se observaron valores más altos de T_p (16 segundos) comparados con el resto del área. Al analizar las fechas de valores altos de T_p y al comparándolas con los campos de viento se observó que justamente estos valores coinciden con la presencia de tormentas en el norte de Atlántico. Estos resultados sugieren que a esta zona del Caribe llega comúnmente oleaje swell que no es generado en el mar Caribe. Además, de acuerdo con las direcciones del oleaje, se muestra oleaje que llega a la zona este del Caribe desde la parte sur de las Antillas menores.

Hacia el centro del Caribe, se puede notar que aumentan los valores de H_s y que su dirección preferencial es en el sentido oriente-occidente. Esto en parte se debe a la dirección de los vientos que soplan desde el este. Este hecho podría enmascarar el oleaje proveniente de otras direcciones. Sin embargo, la zona centro del Caribe es la principal área de generación de oleaje en la cuenca. Ya cerca a la costa Caribe colombiana se observaron los mayores valores de H_s cerca de Barranquilla, disminuyendo estos valores hacia la Guajira y el golfo de Urabá.

En el oeste del Caribe se observaron valores de Hs similares a los mostrados en las afueras de la costa de la península de la Guajira (entre los 0.5 y 2 metros), con dirección nor-oeste después de pasar la plataforma de Nicaragua. En esta región se observaron valores de Tp similares al resto del Caribe. Los resultados sugieren que esta zona podría tener la influencia de oleajes generados desde el golfo de México.

En términos generales, en el mar Caribe el oleaje viaja desde las Antillas menores dirigiéndose hacia el centro de la cuenca donde normalmente es influenciado por vientos locales y finalmente se dirige hacia la costa colombiana, Centro América y el golfo de México. Estos resultados coinciden con lo observado por Londoño (2018) y Padilla (2018), los cuales mostraron como el oleaje en el centro del Caribe tiene una dirección preferente hacia el oeste con los mayores de Hs en esa zona.

4.2. Cálculo de distancias y lugar de origen.

Se calcularon la distancia y lugar de origen de eventos energéticos registrados en las boyas. La boya seleccionada para esto fue la boya EGolfo. Con base en los registros de Hs y Tp de las nueve boyas analizadas en este estudio, entre julio de 2015 y diciembre de 2016, se escogieron eventos con altos niveles de energía del oleaje registrados en la mayoría de boyas y que estuvieran relacionados principalmente con oleaje swell (recuadros en las Figuras 8, 9, 10 y 11).

Se seleccionaron los intervalos que presentaran valores de Tp mayores o iguales a 11 segundos, ya que eventos con valores menores podrían estar asociados a vientos locales. Además, de acuerdo con Osorio (2010) en la entrada del golfo el swell tiene periodos alrededor de 10 segundos. El periodo de tiempo seleccionado además se debería notar en las horas posteriores una disminución de los valores de Tp, esto con el fin de capturar la caída de energía del oleaje. En general los intervalos seleccionados corresponden a eventos asociados al paso de huracanes y al periodo de tiempo asociado a los vientos alisios (diciembre a abril).

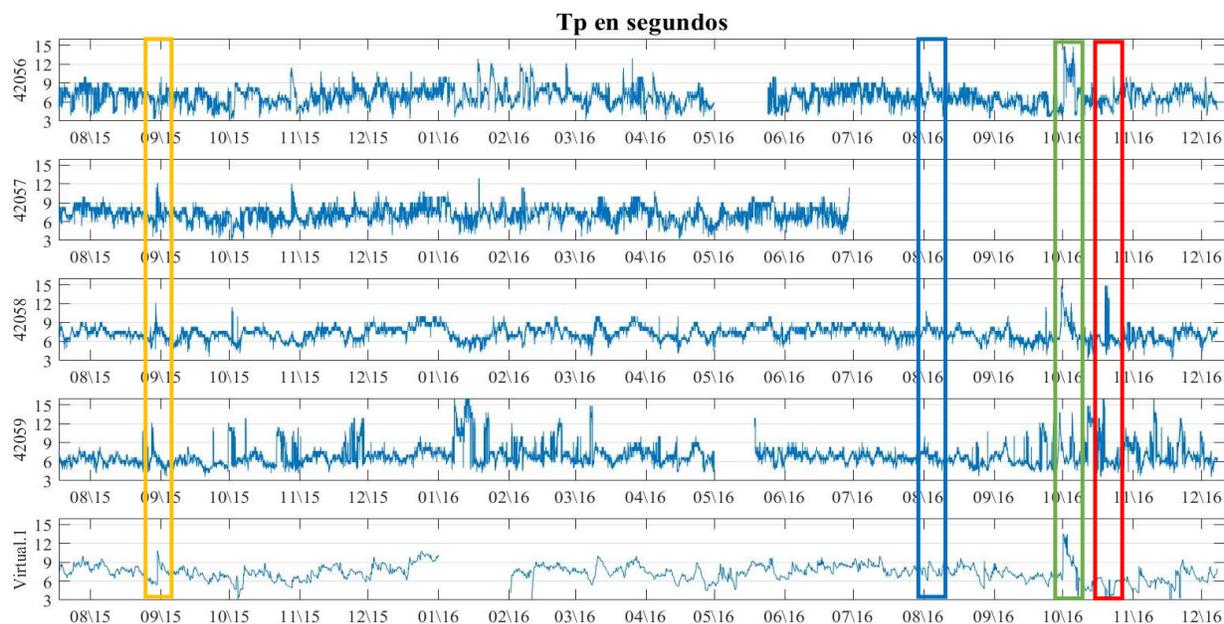


Figura 8. Registro de Tp de las boyas 42056, 42057, 42058, 42059 y Virtual 1. Señalando los eventos analizados con la teoría lineal.

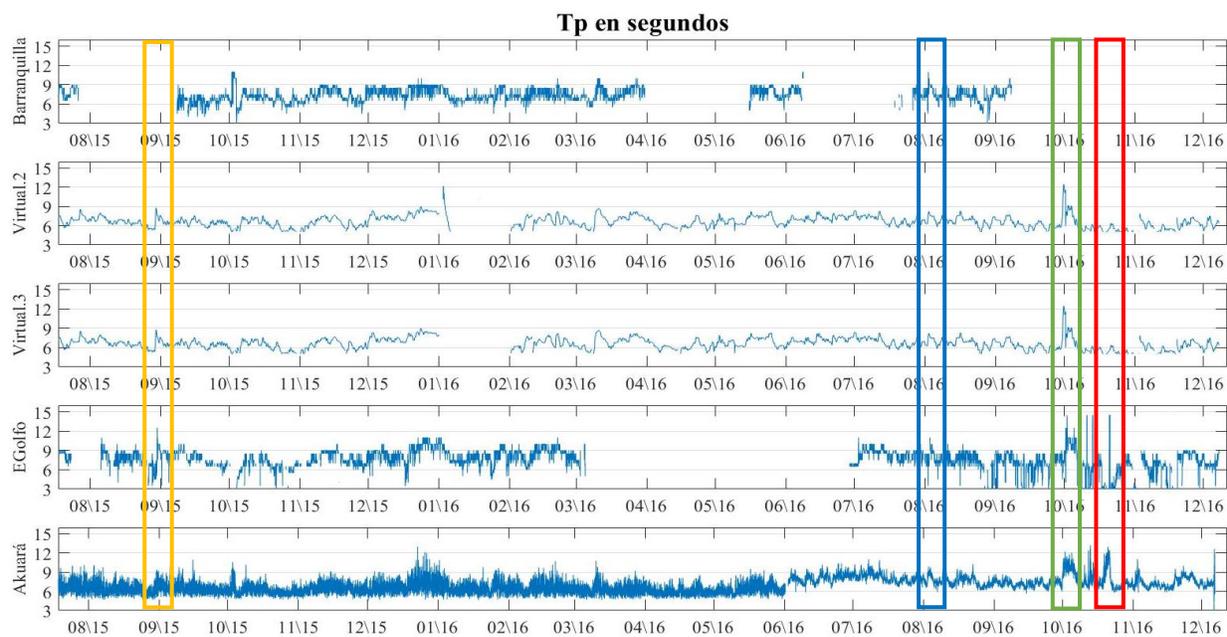


Figura 9. Registro de Tp de las boyas Barranquilla, Virtual 2, Virtual 3, EGolfo y Akuará, señalando los eventos analizados con la teoría lineal.

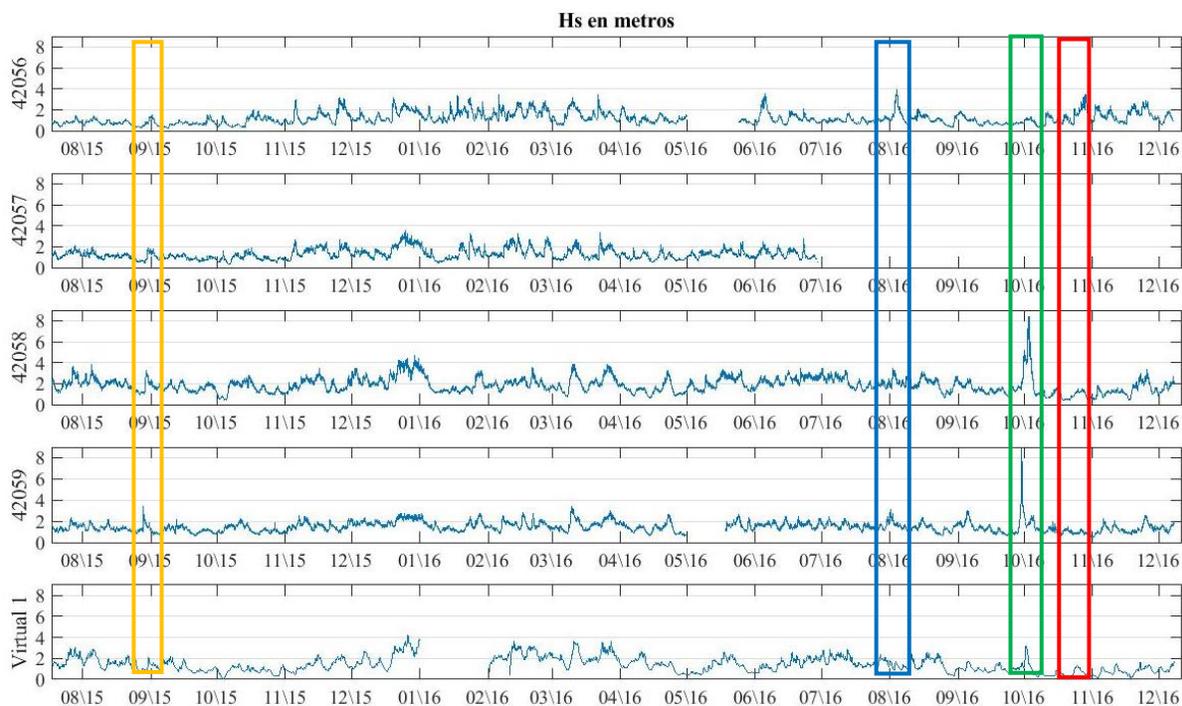


Figura 10. Registro de Hs de las boyas 42056, 42057, 42058, 42059 y Virtual 1, señalados los eventos analizados con la teoría lineal.

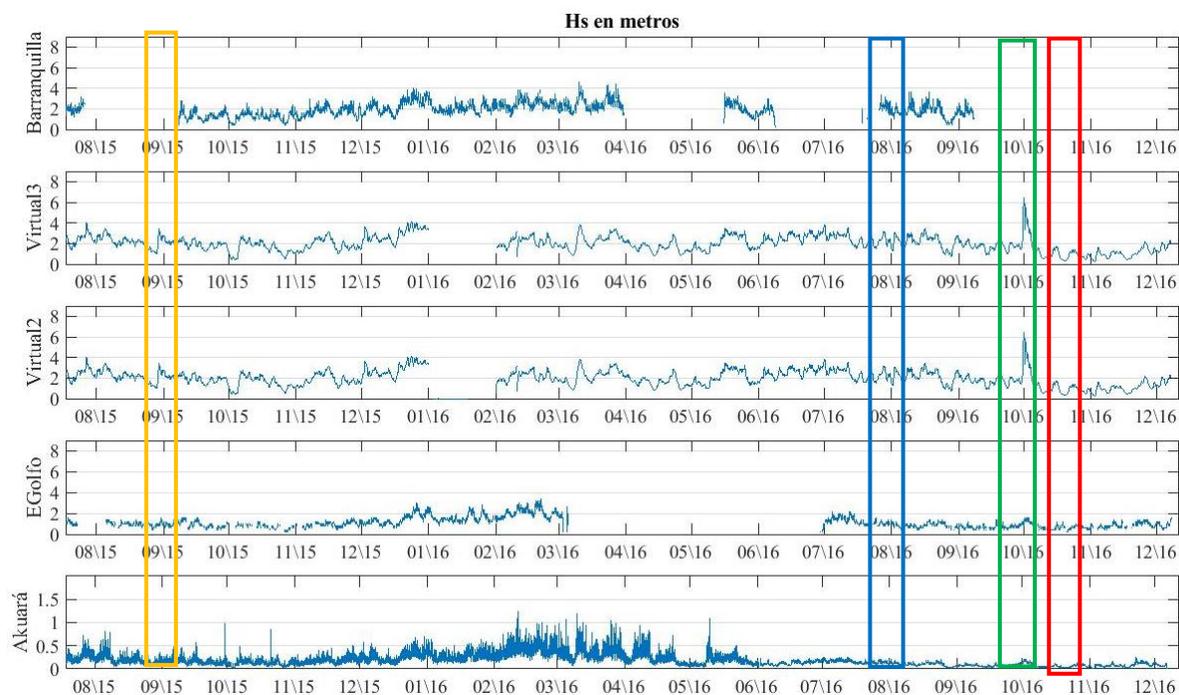


Figura 11. Registro de Hs de las boyas Barranquilla, Virtual 3, Virtual 2, EGolfo, y Akuará, señalados los eventos analizados con la teoría lineal.

Con los periodos de tiempo seleccionados, y con base en el valor de T_p se calculó la frecuencia angular asociada (W , en rad/s) y se realizó el grafico de W vs. T (días). Con estos valores se realizó un ajuste lineal a los datos obtenidos los valores de la pendiente y el intercepto. En la Figura 12 se observa el ajuste de W vs. T para un evento seleccionado luego del paso de la tormenta tropical Erika (2015).

Evento I: Tormenta tropical Erika.

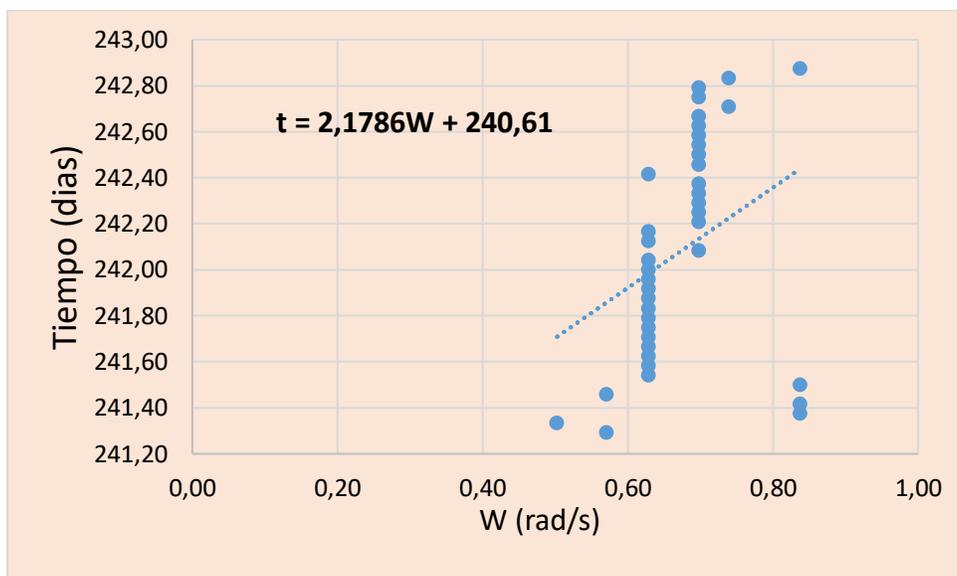


Figura 12. Evento asociado al paso de la Tormenta Tropical Erika (2015).

Los valores de H_s en la boya EGolfo permitieron definir el paso de la tormenta a partir del 30 de agosto de 2015 a las 7.0 horas. El recuadro amarillo en las Figuras (8, 9, 10 y 11), muestran el paso de la tormenta con incrementos de T_p en cada lugar de medición, pero poco o ningún aumento del valor de H_s en las boyas EGolfo y Akuará. El evento tiene valores de W entre 0.50 y 0.84 (rad/s), con valores de H_s entre 0.8 y 1.6 metros, si bien parece estar asociado al swell al parecer puede tener alguna influencia de vientos locales. Esto se supone debido al incremento de H_s en valores relativamente bajos de T_p .

Los cálculos en la boya EGolfo mostraron una distancia de origen de 922.3 Km alrededor del día 29 de agosto a las 14.6 horas. Los campos de vientos unas horas antes y después de la fecha y hora de origen y el radio búsqueda asociado a la distancia, se pueden observar en las Figuras 13 y 14. Se observa como el radio de búsqueda coincide con la ubicación de valores altos de magnitud del viento asociados a la Tormenta Tropical Erika entre las 12 y 18 horas del 29 de agosto.

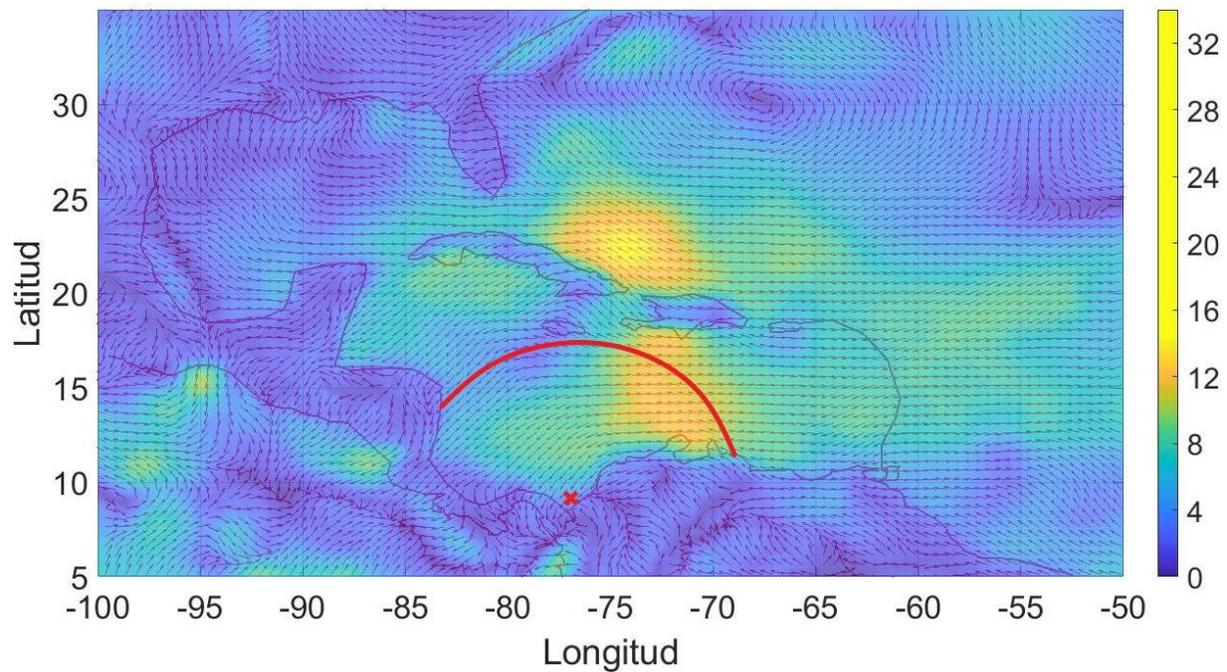


Figura 13. Campo de viento (m/s) correspondientes al 29 de agosto de 2015 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

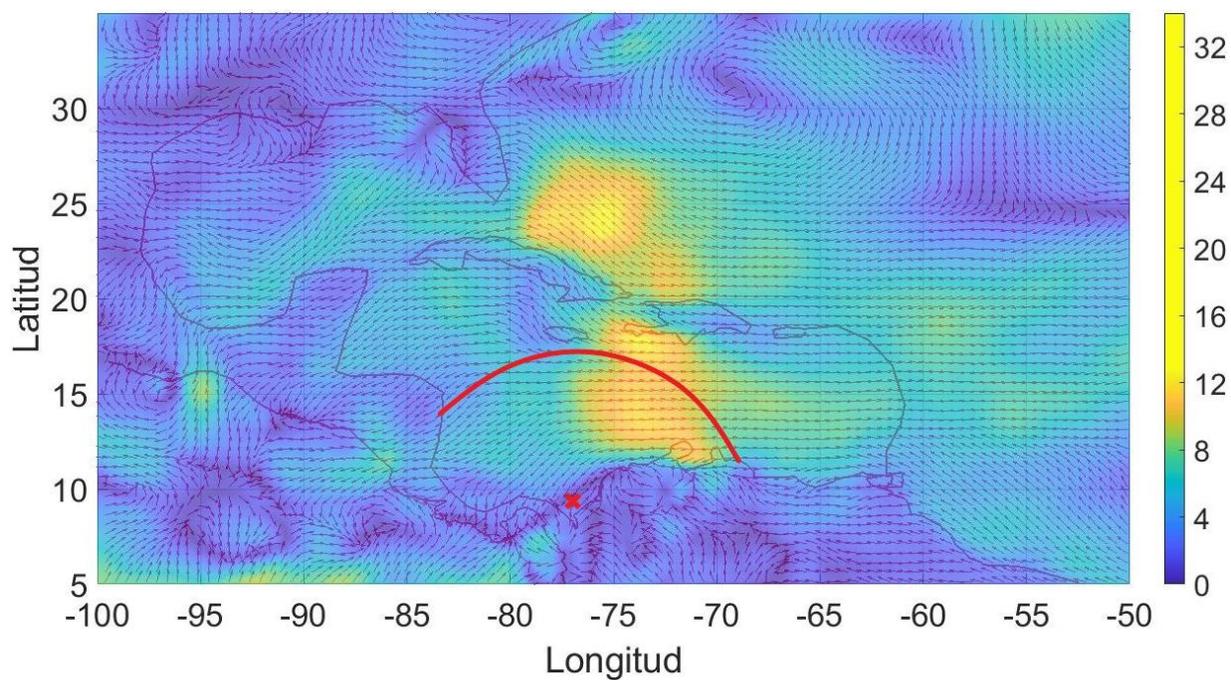


Figura 14. Campo de viento (m/s) correspondientes al 29 de agosto de 2015 a las 18 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

Evento II: Huracán Earl.

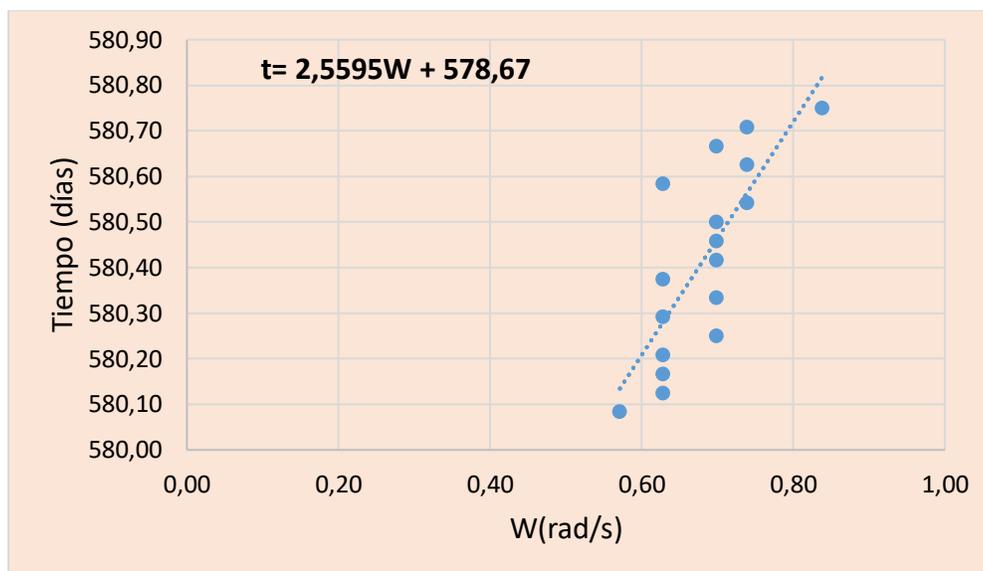


Figura 15. Evento asociado al paso del Huracán Earl (2016).

El evento asociado al Huracán Earl (2016) fue registrado por la boya EGolfo el 03 de agosto de 2016 a las 02 horas. Las frecuencias angulares asociadas están entre 0.57 y 0.84 rad/s y los valores de Hs entre 1.2 y 0.8 metros. Los aumentos de periodos se pueden ver en las Figuras 8, 9, 10 y 11 en los recuadros azules. Este huracán se formó en el Caribe de acuerdo a los registros de la NOAA. En la boya 42056 se presentaron valores de Hs de hasta 4 m, mientras que en las boyas 42058 y 42059 el valor de Hs fue de 3.5 m. De acuerdo a los cálculos realizados la tormenta tiene origen el 01 de agosto de 2016 a las 16 horas, con una distancia al origen de 1083.5 Km.

De acuerdo a los campos de vientos del día 01 de agosto entre las 12 y 18 horas (Figuras 16 y 17) y teniendo en cuenta una radio de búsqueda igual a la distancia al origen, se encontró que coinciden nuevamente las zonas de viento intenso con la distancia al origen de la tormenta. Esto concuerda con el resultado obtenido con la Tormenta Erika.

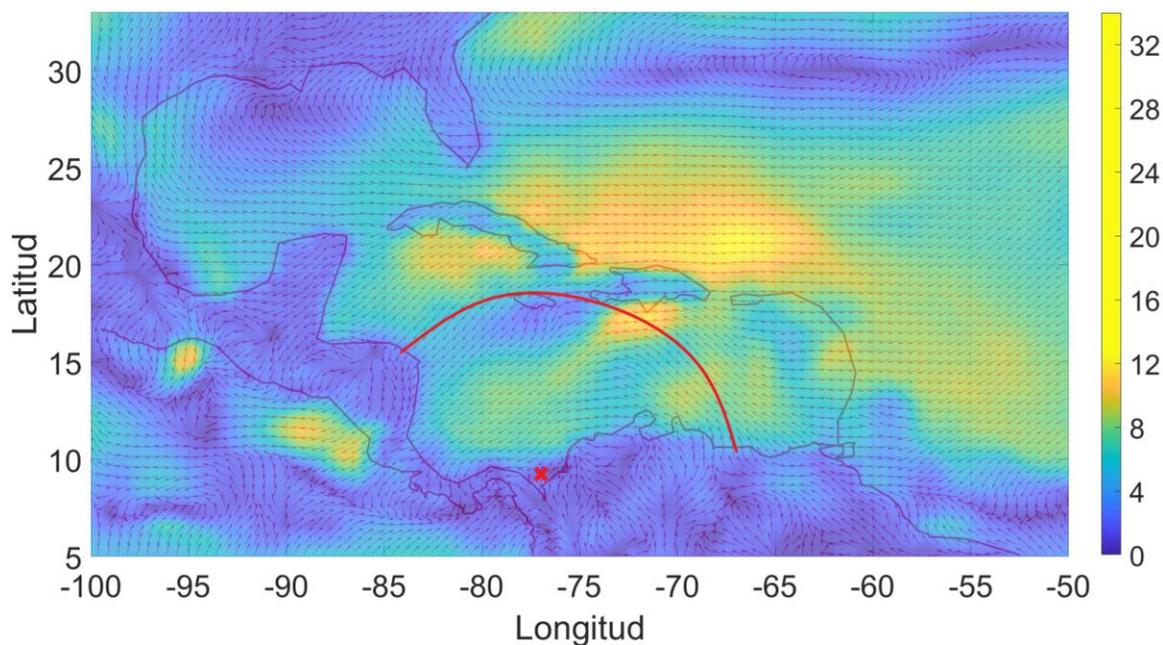


Figura 16. Campo de viento (m/s) correspondientes al 01 de agosto de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

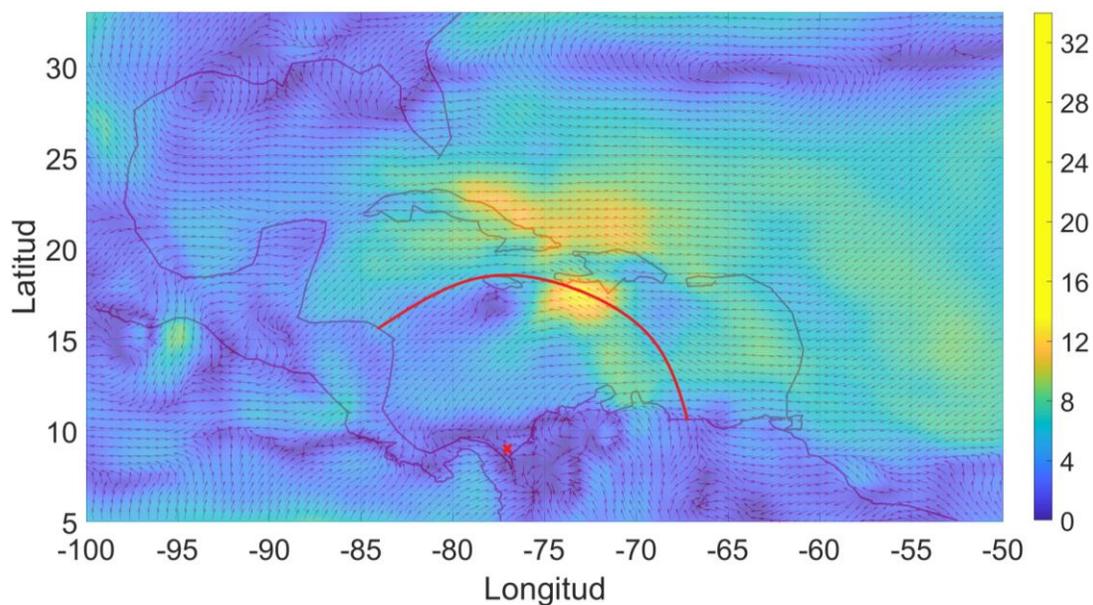


Figura 17. Campo de viento (m/s) correspondientes al 01 de agosto de 2016 a las 18 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

Evento III: Huracán Matthew

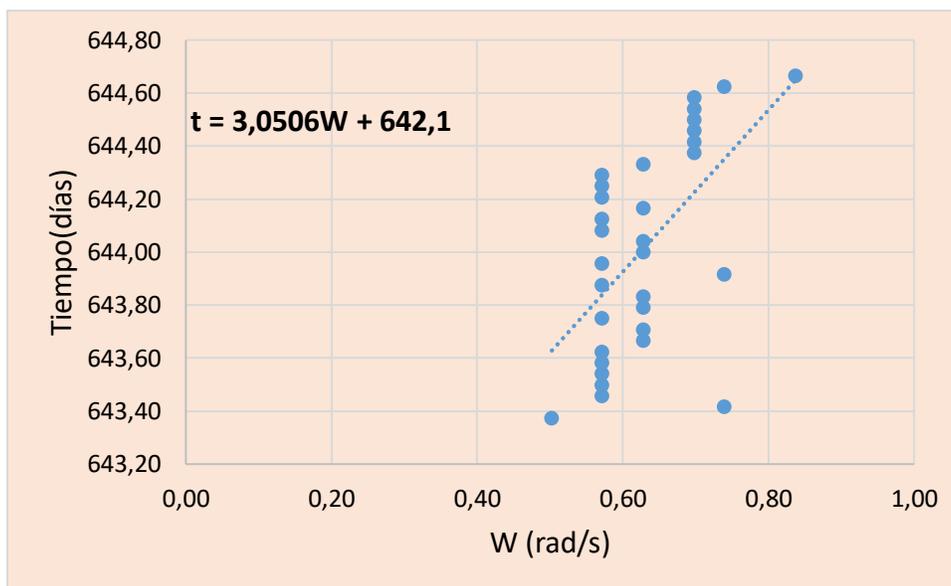


Figura 18. Evento asociado al paso del Huracán Matthew (2016).

Asociado al Huracán Matthew, se seleccionaron los datos desde el 05 de octubre de 2016 a las 09 horas hasta el 06 de octubre de 2016 a las 16 horas. Los valores de T_p en este periodo de tiempo estuvieron entre 7.5 s y 12.5 s. El intervalo seleccionado logra captar tal vez los últimos trenes de olas del Huracán Matthew al salir del Caribe. Los datos de H_s y T_p del huracán Matthew se observan en los recuadros verdes de las Figuras 8, 9, 10 y 11. Este Huracán generó valores de T_p por encima de los 14 s excepto en las boyas Virtual 2, Virtual 3 y Akuará las cuales registraron valores de hasta 12 s. En cuanto a H_s se resalta los valores en las boyas 42059 y 42058 con un máximo de 9.3 y 8.4 metros respectivamente. Mientras que en las boyas Virtual 1, Virtual 2, Virtual 3, se observan valores de H_s alrededor de 6 metros. En la boya EGolfo el valor máximo de H_s fue 1.6 metros, y en la boya Akuará de 0.3 metros.

Este registro tiene valores de frecuencias angulares entre 0.5 y 0.84 rad/s. Con los cálculos realizados se obtuvo una distancia al origen de la tormenta de 1291 Km, con origen el 04 de octubre de 2015 a las 02.2 horas. De acuerdo con los campos de viento del mismo día entre las 6.0 y 12.0 horas y con un radio de búsqueda igual a la distancia a la tormenta, se logró ubicar la zona de vientos intensos al sur del radio de búsqueda, indicando posiblemente que el intervalo seleccionado si fue producido por el Huracán Matthew.

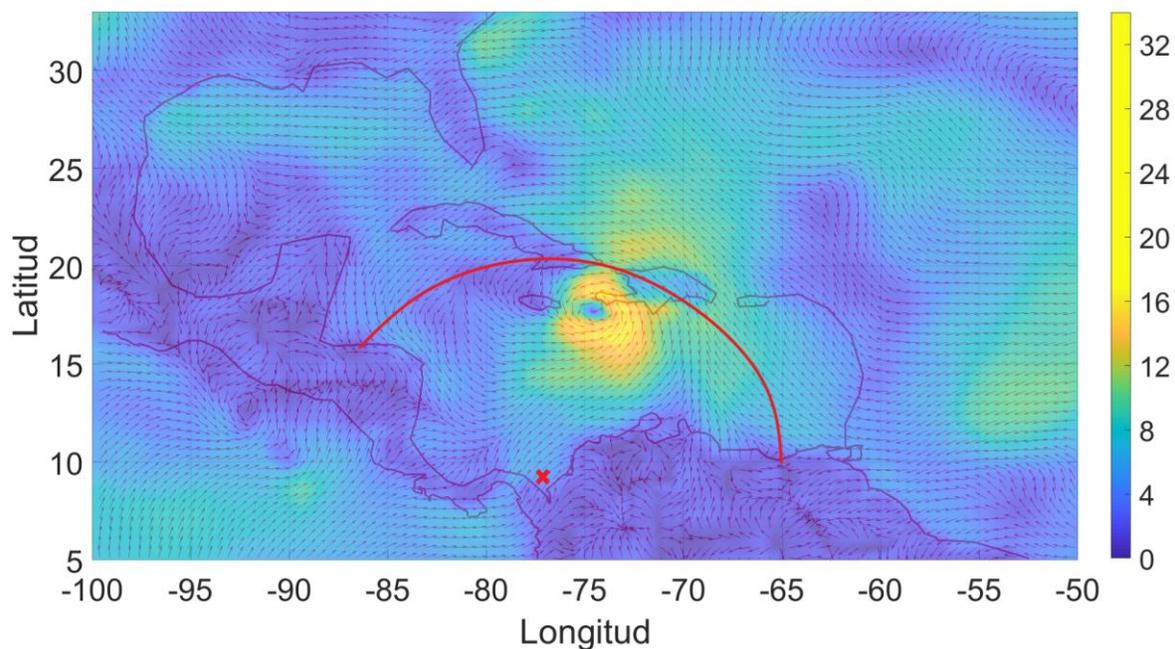


Figura 19. Campo de viento (m/s) correspondientes al 04 de octubre de 2016 a las 06 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

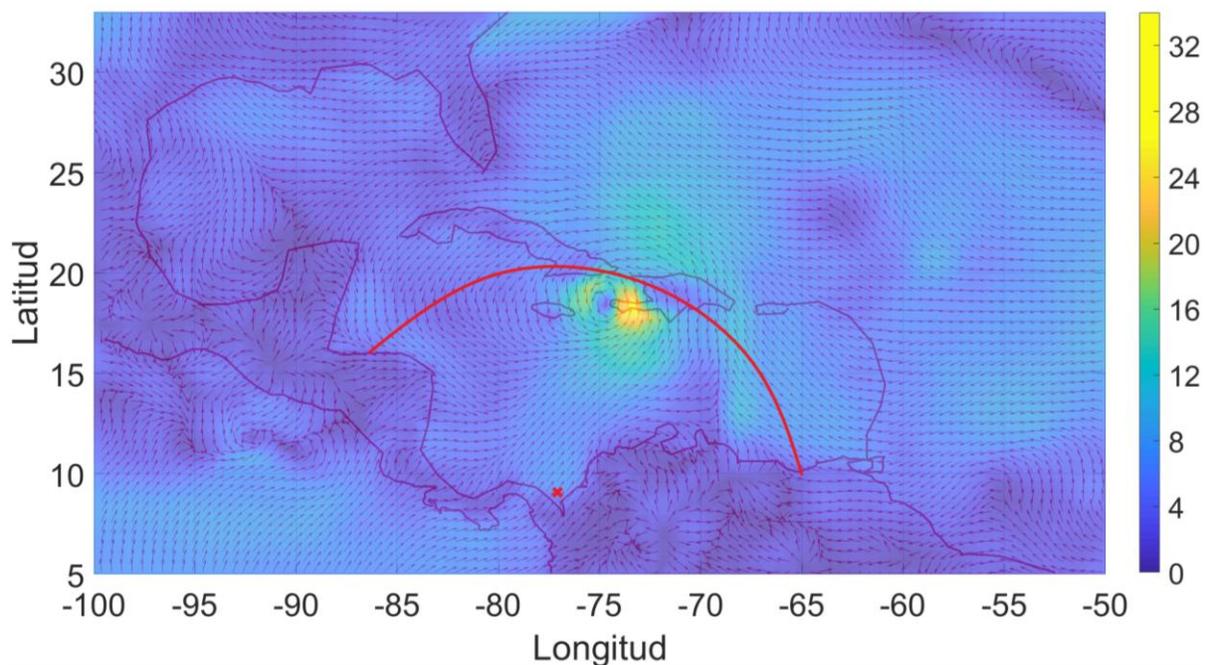


Figura 20. Campo de viento (m/s) correspondientes al 04 de octubre de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

Evento IV: Evento externo

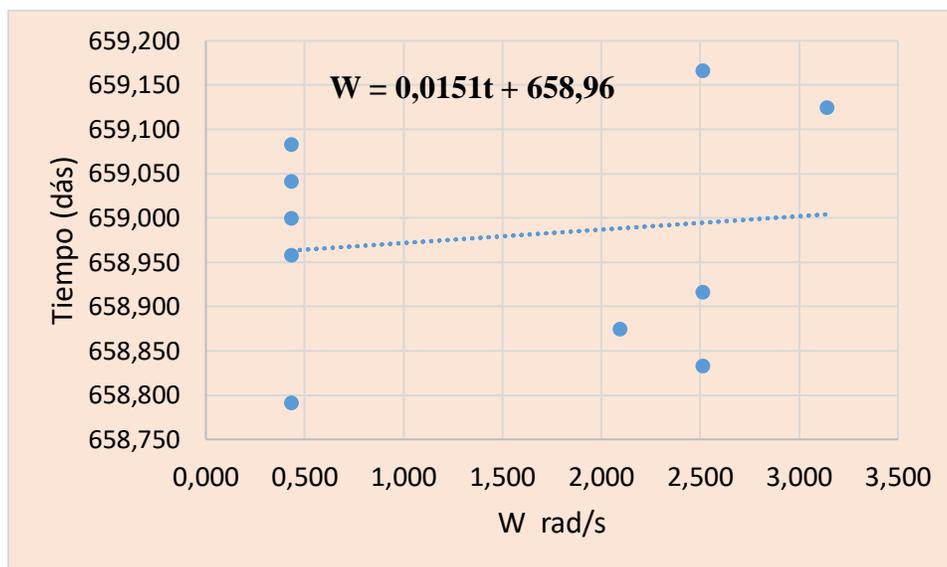


Figura 21. Evento asociado a vientos intensos en el exterior del mar Caribe.

Por último, se buscó en el registro de las boyas un evento por fuera del periodo de tiempo asociado a la presencia de huracanes. Es de notar que este tipo de registros no presenta las características necesarias para este tipo de estudio, ya que en su mayoría corresponden a oleaje generados por vientos locales. Se seleccionó un intervalo de tiempo en el que se sospecha que el oleaje generado podría provenir de afuera del Caribe (recuadros amarillos, Figuras 8 a 11). En los registros de las boyas 42058, 42059, Akuará y EGolfo, se observó un aumento significativo del T_p , pero no incremento de valores de H_s .

De acuerdo a los cálculos se obtuvieron valores de distancia a la tormenta de 6.39 km y con una fecha probable de ocurrencia de 20 de octubre de 2016 a las 20 horas. De acuerdo con el radio de búsqueda asociado a la distancia y teniendo en cuenta los campos de viento de alrededor de la fecha mencionada no fue posible ubicar una zona con magnitudes intensas. De hecho, de acuerdo a los análisis de los campos de viento, en esos días no se presenta ninguna tormenta dentro del Caribe que pudiera generar oleaje, aunque el huracán Nicol se encontraba por fuera del mar Caribe en el norte del océano Atlántico como se muestra en las Figuras 22 y 23.

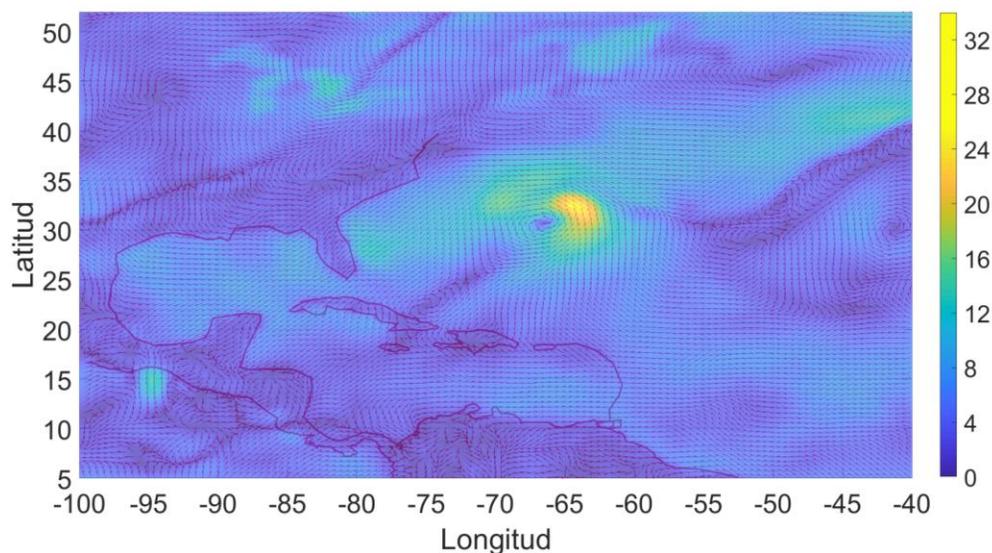


Figura 22. Campo de viento (m/s) correspondientes a el 13 de octubre del 2016 a las 06 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

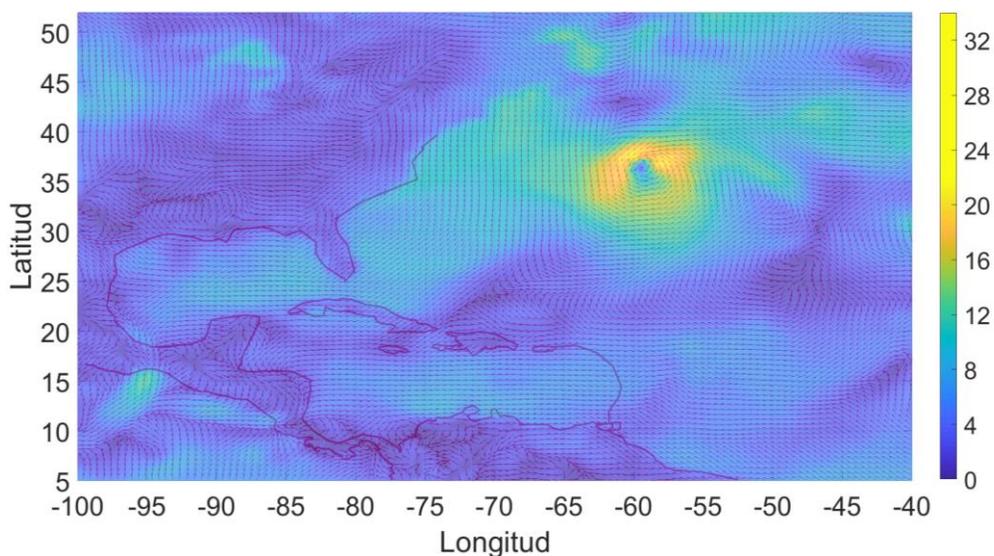


Figura 23. Campo de viento (m/s) correspondientes a el 14 de octubre de 2016 a las 12 horas. El segmento de círculo rojo representa el radio de búsqueda asociado a la distancia al origen, con centro en la boya EGolfo (asterisco rojo).

En los cálculos de distancia y tiempo de origen se encontró que en general los eventos asociados a los huracanes, coinciden con los campos de viento observados. Sin embargo, para eventos asociados a los alisios o a vientos de menor intensidad, los cálculos no concuerdan con los registros de vientos. Por lo tanto, y para los registros analizados, es de notar que los cálculos coinciden con las aproximaciones de la teoría lineal. Estos resultados coinciden con lo observado por Cervantes

(2009) en el Pacífico mexicano. Sin embargo, es de notar que las características del oleaje swell en el Pacífico son mucho más marcadas que en el Caribe, además tiene tres puntos de medición, en 20 Km, que calculan parámetros integrales cada 30 minutos y tiene el espectro de frecuencia lo que permitió una mejor caracterización de los eventos.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se obtuvo una mejor representación a partir de la teoría lineal cerca de golfo de Urabá, cuando se analizan oleajes asociados a eventos energéticos como los huracanes o tormentas tropicales. Esta representación puede estar asociada a que durante estos eventos el oleaje tiene una dirección predominante y de acuerdo a sus mismas características se producen grupos de olas bien organizadas. En eventos menos energéticos o producidos dentro del Caribe no fue posible utilizar de manera adecuada la teoría lineal, probablemente debido al tipo de registro temporal de las boyas y a la presencia de diferentes fuentes de oleaje.

El oleaje dentro del Caribe colombiano puede clasificarse como oleaje local (windsea) por la constante presencia de vientos que lo modifican. La zona central del mar Caribe presenta los mayores valores de Hs debido a la presencia generado desde el este combinado con oleaje local.

Los valores de Hs de mayor magnitud en las afueras del Golfo de Urabá están asociados a los vientos en el Caribe. Los valores de Hs por encima de 3 metros en su mayoría son generados por los vientos alisios, aunque los huracanes generan los mayores valores de Hs en el Caribe colombiano con valores de hasta 9 metros. En el caso de Tp, los mayores valores se asocian a eventos generados por tormentas más lejanas. La zona del golfo de Urabá tiene los valores de Tp más altos probablemente debido a las tormentas locales de Caribe colombiano.

En cuanto a los datos modelados, se observaron valores bajos durante los eventos extremos por lo cual sería importante instalar más boyas en el Caribe colombiano. Esto permitirá caracterizar de manera adecuada el oleaje bajo condiciones extremas.

6. TRABAJO FUTURO

A futuro se sugieren realizar las siguientes actividades:

- Mediciones de oleaje alta resolución temporal y con registros en varios lugares alrededor del Golfo de Urabá, con el fin de mejorar la caracterización de los eventos de periodo largo.
- Caracterizar de manera adecuada la presencia del oleaje que llega al Golfo de Urabá desde el Caribe y el oleaje que es generado de manera interna.

6. REFERENCIAS

- Airy, G. B. (1841). "Tides and waves". In Hugh James Rose; et al. (eds.). *Encyclopædia Metropolitana. Mixed Sciences*. 3 (published 1817–1845). Also: "Trigonometry, On the Figure of the Earth, Tides and Waves", 396 pp.
- Álvarez, O., Osorio, A.F., y Gómez, A., (2012). Determinación del régimen medio de oleaje en la desembocadura del río León. *DINA*, 79(173), 95-102.
- Andrade C., (2015). *Oceanografía dinámica de la cuenca de Colombia*. Cartagena de Indias, Colombia. Alpha.
- Alves, J. H. G. M. (2006). Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, 11:98-122.
- Barber, N. F., y F. Ursell, 1948; The generation and propagation of ocean waves and swell I: Wave periods and velocities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Science*, 240(824), 527-560.
- Bernal, G., Osorio, A.F., Urrego, L., Pelaez, D., Molina, E., Zea, S., Montoya, R. D., Villegas, N., (2016). Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean costas and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*. 164, 85-100
- C, Sánchez & A, Pedrozo & Rosales-Sierra, Victor & Silva, Rodolfo. (1998). Caracterización del clima marítimo en Tuxpan, Veracruz.
- Cervantes I. (2009). *Variabilidad del oleaje de periodo largo en el Golfo de Tehuantepec*. (Tesis de pregrado). Universidad del Mar. Puerto Ángel, México.
- Diaz J. M., (2007). *Deltas y Estuarios de Colombia*. Cali, Colombia. Comité Editorial Banco de Occidente. ISBN 9789589674987
- Fett, R. W., y Rabe, K. M., (1976). Island Barrier Effects on Sea State as Revealed by Numerical Wave Model and DMSP Satellite Data. *Journal of Physical Oceanography* 6(3), 324-334.

- García-Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras Invemar y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12. Santa Marta, Colombia. 180p.
- Garrison, T. (2011) *Essentials of Oceanography*, Belmont USA: Editorial Cengage Learning.
- Londoño, W. (2018). *Cambio en el espectro del oleaje que ingresa al Caribe colombiano debido a la presencia de las Antillas menores* (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia. Turbo, Colombia.
- LeBlond, P. H., y Mysak, L. A., (1978). Waves in the ocean. Amsterdam, Netherlands. *Elsevier Oceanography Series 20*.
- Lonin S., Tuchkovenko Y., Lonina I. (1996). Utilización del Modelo Nedwam para el Cálculo y Pronóstico del Oleaje en el Mar Caribe. *Boletín Científico CIOH* (17), 37-45.
- Molina, L. (2014). *Estudio de la disipación de energía de flujos hidrodinámicos y transporte de sedimentos. Caso de aplicación: Golfo de Urabá* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia
- Munk, W., Miller, G., Snodgrass, F., & Barber, N. (1963). Directional Recording of Swell from Distant Storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 255(1062), 505-584. from <http://www.jstor.org/stable/73101>
- Orejarena, A. F., Otero, L.J., Dagua, J.C., Marriaga, L., y Herrera, E. (2013). Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH* (31), 109-124.
- Ortega, S., Osorio, A. F., Agudelo, P., y Vélez, J. I. (2010). Generación de series sintéticas de oleaje en lugares con instrumentación escasa en el mar Caribe colombiano. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay.
- Osorio, A.F., Mesa, J.C., Bernal, G.R., y 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.

- Osorio, A.F., Gómez, A., Molina, L., Álvarez, O., Osorio, J., (2010). Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local (sea) y de fondo (swell) en el golfo de Urabá. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica* Punta del Este, Uruguay.
- Osorio, A.F., Montoya, R.D., Ortiz, J.C., y Peláez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research*, 56, 119-131.
- Padilla, S. (2018). *Análisis espectral del oleaje en el litoral antioqueño por medio de modelación numérica* (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia. Turbo, Colombia.
- Pinet, P. (2009). *Invitation to oceanography*, Sudbury USA. Jones and Bartlett Publishers.
- Posada, P., Blanca Oliva y Henao P., William, 2008. Diagnóstico de la erosión en la zona costera del caribe colombiano INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13, Santa Marta, 200 páginas.
- Snodgrass, F. E., Groves, G. W., Hasselmann. K. F., Miller, G. R., Munk. W. H & Powers W. H. (1966), Propagation of ocean swell across the pacific, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie A*, 259(1103), 431-497.
- 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.

ANEXOS

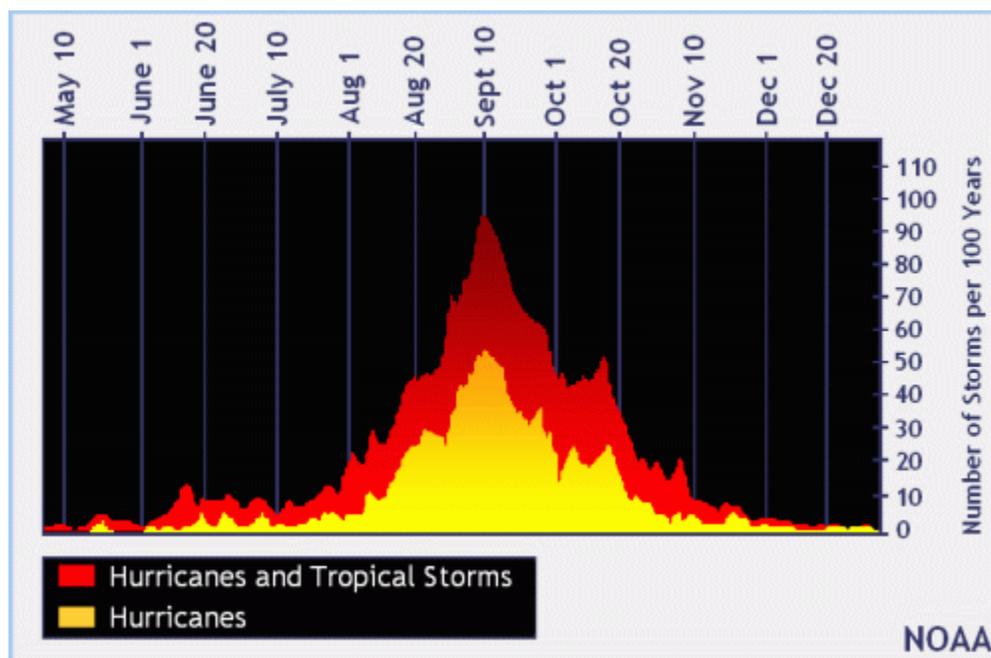


Figura 24. La temporada oficial de huracanes para la Cuenca Atlántica (Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México) es del 1 de junio al 30 de noviembre. Como se ve en el gráfico anterior, el pico de la temporada es desde mediados de agosto hasta finales de octubre. Sin embargo, los huracanes mortales pueden ocurrir en cualquier momento durante la temporada de huracanes. Fuente <https://www.nhc.noaa.gov/climo/#cp100>

Boya	Latitud	Longitud
Akuará	8°27'35.7'' N	76°50'18'' W
EGolfo	8°50'59'' N	76°56'55'' W
Barranquilla	11°8'8'' N	74°45'39'' W
42056	19°49'12'' N	84°56'41'' W
42057	16°54'30'' N	81°25'18'' W
42058	14°46'32'' N	74°32'52'' W
42059	15°15'9'' N	67°29'0'' W
Virtual 1.	13°4'35.5'' N	73°0'44.9'' W
Virtual 2.	10°23'1.33'' N	76°44'30.6'' W
Virtual 3.	9°48'52.6'' N	77°50'15.5'' W

Tabla 1. Coordenadas de las boyas utilizadas