



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MODULACIÓN DE OLEAJE CAUSADO POR LA CONSTRUCCIÓN DE
UNA OBRA DE PROTECCIÓN COSTERA UTILIZANDO UN MODELO
NUMÉRICO CON MALLAS NO ESTRUCTURADAS. CASO DE
ESTUDIO PUERTO REY-MINUTO DE DIOS**

Autor
Ferney Orejuela Moreno

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento (Escuela ambiental)
Turbo, Colombia
2020



**MODULACIÓN DE OLEAJE CAUSADO POR LA CONSTRUCCIÓN DE
UNA OBRA DE PROTECCIÓN COSTERA UTILIZANDO UN MODELO
NUMÉRICO CON MALLAS NO ESTRUCTURADAS. CASO DE ESTUDIO
PUERTO REY-MINUTO DE DIOS**

Ferney Orejuela Moreno

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- Director

Pedro Osuna. Ph.D. Oceanografía Física; Investigador, CICESE México.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Departamento, Escuela, Ambiental.
Turbo, Colombia
2020.

Dedicatoria y Agradecimientos.

Esta investigación está dedicada a mi familia quienes han vivido conmigo esta lucha de principio a fin, infinitas gracias por apoyarme en este sueño.

A la persona que hizo esta investigación fuese posible. Vladimir G. Toro Valencia por su compromiso en esta investigación, por su paciencia y recomendaciones en este trabajo.

A la Gobernación de Antioquia y a proyecto “Investigación para la reversión de proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, Ascon 18-417” liderado por el CESET de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia y en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín) y la Universidad del Norte

Al profesor José P. Osuna y María C. Valencia por sus recomendaciones y las correcciones realizadas para mejorar la calidad de investigación.

A la Universidad de Antioquia por haberme formado no como profesional sino como persona íntegra.

A los docentes de la Universidad de Antioquia sede Ciencias del mar por compartir sus conocimientos con nosotros y en especial al Yubian Henao, Juan Pablo Niño y Jorge Velásquez

A la universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por recibirnos con los brazos abiertos y por permitir el acceso al servidor UNICA en el cual se ejecutaron las simulaciones de este trabajo de grado

A los ingenieros oceanográficos José M. Calderón y Sergio Padilla por las asesorías con el modelo Wave Watch III™ y en especial por estar siempre dispuestos ayudar con dudas ¡Gracias!

Al Profe Víctor Saavedra por su asesoría en modelación y completa disposición para ayudarme con cualquier duda ¡Muchas gracias!

A Eidy Sipion y Víctor Otálvaro por estar siempre presto ayudarme con su pc. ¡Gracias!

A mis amigos de pregrado por ayudarme a superarme cada día como persona, sin su apoyo este sueño nunca fuese sido posible.

RESUMEN

El litoral del municipio de Arboletes tiene una longitud de 5.5 km de línea de costa ubicado en la costa sur del Caribe Colombiano. En los últimos años, se han presentados procesos erosivos intensos en donde se han registrado retrocesos de hasta 1.6 km en el área de Puerto Rey. Teniendo en cuenta que la línea de costa de este lugar ha sido modulada en gran parte por acciones antrópicas, como la construcción de obras sin rigurosidad técnica, es necesario entender los procesos asociados al comportamiento del oleaje y sus posibles implicaciones en los procesos erosivos. Con este fin, se implementó el modelo WAVEWATCH III™ (WWIII™, versión 6.07) y de esta manera estudiar la modulación del oleaje causado por la construcción de obras de protección costera utilizando mallas no estructuradas. Las mallas no estructuradas permiten estudiar procesos del oleaje a escalas espaciales del orden de metros cerca de la línea de costa sin la necesidad de utilizar anidamiento de mallas. Respecto a las condiciones de frontera para la implementación de las mallas no estructuradas, se utilizaron los resultados del modelo WWIII™ implementado para el Caribe Colombiano. En esa implementación se utilizaron mallas rectangulares de $1/24^\circ$ (4.625 Km) y se obtuvieron resultados para el periodo entre noviembre de 2018 y febrero de 2019 (época seca). Luego se propusieron escenario con y sin obras de protección costera para determinar cuál es el porcentaje de disipación de energía del oleaje. Los resultados de las comparaciones de los campos de oleaje de escenarios sugieren que hay una disminución de altura

Palabras claves: WAVEWATCH III™; Caribe Colombiano; Arboletes; mallas no estructuradas.

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo General	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. MARCO TEÓRICO	12
3.1. El Oleaje	12
3.2. Tipos de oleaje.....	12
3.3. Parámetros integrales	13
3.4. Espectro de oleaje	14
3.5. Mallas estructuradas y mallas no estructuradas	14
3.6. Modelo WAVEWATCH III™	15
4. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA.....	16
4.1. Área de estudio.....	16
4.2. Información secundaria utilizada	17
4.3. Modelación numérica.....	19
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	21
5.1. Resultados sin obras.....	21
5.2. Resultados con la obra (espiga litoral)	24
6. CONCLUSIONES	28
7. RECOMENDACIONES.....	29
8. REFERENCIAS	30

Lista de figuras

- Figura 1:** Escala de energía arbitraria de las ondas en el océano, en función de su periodo/frecuencia asociada y el nombre que se les da. Holthuijsen (2007) 12
- Figura 2:** (a) Malla estructurada. (b) malla no estructurada. Tomado de https://www.researchgate.net/figure/On-the-left-a-structured-mesh-with-fixed-number-of-neighbors-for-cells-and-vertices-On_fig2_264894615/actions#reference 15
- Figura 3:** Área de estudio que comprende la zona costera de los municipios costeros de Los Córdoba (departamento de Córdoba) y Arboletes (departamento de Antioquia) ... 16
- Figura 4:** (A). Batimetría del área de estudio sin obra de protección costera. (B) Batimetría del área de estudio con obra de protección costera (simulando la espiga litoral)..... 17
- Figura 5:** Ubicación de los puntos de las condiciones de frontera para al modelo WAVE WATCH III™ 18
- Figura 6:** (a) Malla no estructurada generada a partir de la batimetría original. (b) Malla no estructurada generada a partir de la batimetría, incluye la obra de protección costera (espiga litoral) 19
- Figura 7:** *Campo promedio mensuales de direcciones y altura de olas significantes sin obra para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019, (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (Diciembre-febrero) 22*
- Figura 8:** Histogramas del campo promedio mensual de direcciones y altura de olas significantes sin obras para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019 y (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (Diciembre-febrero 23
- Figura 9:** Campo promedio mensuales de direcciones y altura de olas significantes con obra para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019, (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (Diciembre-febrero) 24
- Figura 10:** Histogramas del campo promedio mensual de direcciones y altura de olas significantes sin obras para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019 y (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (Diciembre-febrero) 25
- Figura 11:** Campo de Hs resultante entre la razón del campo sin y con obra..... 26

Lista de tablas

Tabla 1. Formulaciones y parametrizaciones utilizadas en el modelo	20
---	----

1. INTRODUCCIÓN.

La energía del oleaje es uno de los factores más importantes a considerar en el diseño y construcción de estructuras en la zona costera, sean estas para recreación o para protección. El oleaje puede producir transformaciones en el paisaje litoral, siendo uno de los principales generadores de procesos erosivos e inundaciones cerca de la costa. La alta energía del oleaje, puede afectar ecosistemas marinos, como arrecifes de coral y manglares, estructuras de ingeniería como puertos, diques y escolleras y generar trastornos en actividades como la pesca, la extracción de petróleo y el tráfico marítimo. Este estudio se desarrollará en el extremo sur-oeste de mar Caribe Colombiano.

Uno de los primeros estudios del oleaje en el Caribe fue realizado por González (1990), el cual llevó a cabo un estudio sobre clima del oleaje entre Santa Marta y Bocas de Ceniza con base en información medida por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Posteriormente, (Lonin et al., 1996) implementaron el modelo NedWAM (Netherland Wave Model) con el fin de realizar el pronóstico de los parámetros integrales del oleaje en el Caribe. Horrrillo et al., (2000) utilizaron una metodología estadística con la cual determinaron la altura del oleaje basado en observaciones visuales de olas y vientos en el Caribe Colombiano.

Osorio et al. (2009) analizaron 40 años de datos históricos de oleaje para el Caribe colombiano con WWW III TM, utilizando información de dirección y magnitud del viento de Reanalysis - NCEP/NCAR. Los resultados muestran una variabilidad espacial del oleaje, modulada por el ciclo anual y valores extremos de viento. Estos autores generaron series de tiempo de parámetros integrales (Hs, Tp y θ) en tres boyas "virtuales" ubicadas en el Caribe colombiano (Guajira, Barranquilla y Golfo de Morrosquillo). Más tarde, Ortega et al., (2010) generaron series sintéticas de altura de ola significativa para el norte del Caribe colombiano, utilizando una metodología que permitió determinar los regímenes del oleaje en lugares donde se cuenta con información escasa. Luego Restrepo et al. (2012) y Ortega et al. (2013), realizaron la caracterización del oleaje en algunas islas del Caribe colombiano. Sus resultados muestran que para el archipiélago de las islas del Rosario el estado de mar es dominado en un 72% por la presencia de olas provenientes al noreste, con alturas promedio de 0.71 +/- 0.4 m.

Dagua et al. (2013) realizaron una modelación del oleaje para el Caribe con el modelo SWAN en donde la variación de la correlación lineal entre el modelo y los datos in situ estuvo entre 0,69 y 0,87. Estos valores sugieren un grado satisfactorio de correspondencia entre ellos. Osorio et al., (2016) determinaron la influencia del ENSO en la altura significativa del oleaje, reconociendo 4 épocas climáticas en el año. Durante la Niña (meses de diciembre a febrero) se observaron los máximos valores de energía del oleaje en la parte central del Caribe, debido a un aumento de la magnitud de los vientos alisios modulados por el chorro de bajo nivel de San Andrés (Montoya et al., 2015). De igual manera, en este trabajo se generaron series sintéticas de parámetros integrales del oleaje en boyas virtuales a lo largo del Caribe colombiano (una ubicada en el extremo norte del Golfo de Urabá) para un periodo de 32 años.

En este mismo sentido, Inger et al. (2015) determinaron el clima medio y extremal del oleaje utilizando datos de salida del modelo WWW III™ y datos de una boya de la Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR). Estos autores reportan que para la época seca (diciembre-abril), la velocidad del viento proviene del noroeste y que la altura significativa del oleaje es la más energética, contrastando con la época de lluvia (septiembre-noviembre). Rangel et al. (2015) determinaron la altura significativa del oleaje en el Caribe durante la ocurrencia de frentes fríos, entre enero y marzo. En este mismo sentido, Ortiz et al. (2013) encontraron que a inicios de año se incrementan los vientos alisios provenientes del noroeste, los cuales provocan un fuerte oleaje que llega a la línea de costa 48 h después de que son generados. En general, una de las dificultades encontradas en los trabajos antes mencionados, es la falta de información medida del oleaje. En algunos casos los resultados obtenidos son limitados debido a la falta de información in situ que permitiera su validación.

De manera específica, en el golfo de Urabá se han realizado trabajos que han caracterizado el oleaje. Orejana et al. (2013) validaron y determinaron el clima de oleaje medio y extremo para la zona norte. Para esto, utilizaron una serie de oleaje sintético de once años, obtenido de los resultados del modelo global de oleaje WWIII™. Estos autores encontraron que las alturas del oleaje guardan una estrecha relación con las épocas climáticas del año. Además, determinaron valores de altura de oleaje en la parte exterior del Golfo de 4,5 y 4,9 m para periodos de retorno de 25 años y 100 años, respectivamente.

Como se ha visto, en la mayoría de los casos de modelación, las caracterizaciones del oleaje se han basado en parámetros integrales. La principal desventaja de utilizar estos parámetros es que la descripción energética del oleaje es muy burda. Esto es un problema especialmente en sitios en los que coexisten dos sistemas de ondas diferentes (Portilla et al., 2015), como el Golfo de Urabá, o cerca de la línea de costa donde, debido a la presencia de estructuras naturales o artificiales, la energía sufre importantes modificaciones.

Londoño (2018) determinó a partir del espectro en frecuencia del oleaje, el porcentaje de energía del oleaje que se disipa por las Antillas menores cuando esta entra y se propaga en el Caribe. Para el golfo de Urabá y litoral antioqueño, Padilla (2018) presentó un análisis espectral del oleaje utilizando el modelo WWIII™. En este trabajo, se determinaron las características espectrales del oleaje en cuatro zonas al interior del Golfo. Nuevamente, se encontró que la dirección promedio del oleaje está en función de las épocas climáticas.

Tanto Londoño (2018) como Padilla (2018) mejoraron la descripción espacial del oleaje en el Caribe y en el golfo de Urabá. A pesar de que sus resoluciones son finas (del orden de centenas de metros), en análisis de procesos costeros es necesaria una resolución mayor. A nivel de modelación es posible hacerlo con mallas anidadas. Sin embargo, su uso incrementa de manera notable el gasto computacional.

Una malla flexible puede permitir realizar una distribución eficiente de los nodos de cálculo sobre el dominio del modelo. Esto se puede hacer con la ayuda de una malla no estructurada. Wei et al. (2018), hicieron un estudio de modelación numérica del oleaje en la costa central de Oregón con el fin de caracterizar la energía del oleaje. Para esto, utilizaron el modelo WWIII™ con una malla regular y el modelo SWAN con malla no estructurada. Los resultados de este estudio demostraron las ventajas de la modelación con malla no estructurada en términos de su eficiencia computacional y flexibilidad para la caracterización de un estado de mar en zonas costeras o poco profundas. Estos resultados sugieren que un modelo con malla no estructurada podría ser utilizados para determinar las características del oleaje en zonas con batimetría y línea de costa irregular como Punta Rey.

De manera específica en el sector de Punta Rey (Arboletes) se han evidenciado retrocesos significativos de la línea de costa durante las últimas 4 década (Correa et al., 2004). Relatos de los colonos del lugar, aseguran que en los años 50 se construyó un canal que partió en dos la península de Punta Rey con el fin de comunicar por vía marítima, de una forma más ágil, a los municipios de Arboletes y los Córdoba. Existen otros relatos que apuntan a que fueron procesos de exploración de petróleo, que, al usar dinamita, crearon el canal. Hasta el momento no ha sido posible verificar estas dos hipótesis. Sea cual fuere el motivo, a partir de ese momento la espiga se debilitó y desapareció aumentando los procesos de erosión costera en el litoral del municipio de Arboletes. Se supone, que al desaparecer la Punta la batimetría y línea de costa se hicieron más complejos. Esto al parecer incremento de los procesos erosivos y el interés cada vez más claro de las personas del lugar por realizar obras de protección costeras en la zona. Con el fin de avanzar en el entendimiento de los procesos de oleaje en el área de Punta Rey, se propone esta investigación. El objetivo principal es caracterizar los procesos de oleaje asociados a la implementación de una obra de protección costera en Punta Rey usando un modelo numérico espectral de oleaje que utiliza mallas no estructuradas

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar la modulación que sobre el oleaje que podría producir una obra de protección costera en el municipio de Arboletes-Colombia utilizando un modelo numérico con mallas no estructuradas.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar las características principales de la malla no estructurada a utilizar.
- Proponer escenarios posibles de obras de protección costera para la zona del litoral antioqueño en la zona de Arboletes.
- Determinar las zonas de disipación y concentración de la energía del oleaje producidas por la obra de protección costera.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. El Oleaje

El oleaje es la fluctuación del nivel del mar que es provocada por el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar (Tovar y Yamá, 2009). El oleaje es una onda de gravedad que puede tener periodos (T) entre 1 y 30 segundos y frecuencias (f) entre 10^{-6} y 10^{-1} Hz (ver figura 1). El lugar donde sopla el viento sobre la superficie del mar y genera las olas es llamado fetch.

Las olas producidas por el viento se propagan principalmente en la dirección del viento. En su recorrido pierden energía por fricción con la atmósfera y viscosidad molecular, hasta alcanzar las costas, donde se disipan finalmente por procesos de rotura (Universidad de Cantabria *et al.*, 2000). En términos de su ubicación respecto a la zona de fetch, puede ser categorizado como forzado (oleaje local o wind sea) y como libre (oleaje generado por tormentas lejanas o swell).

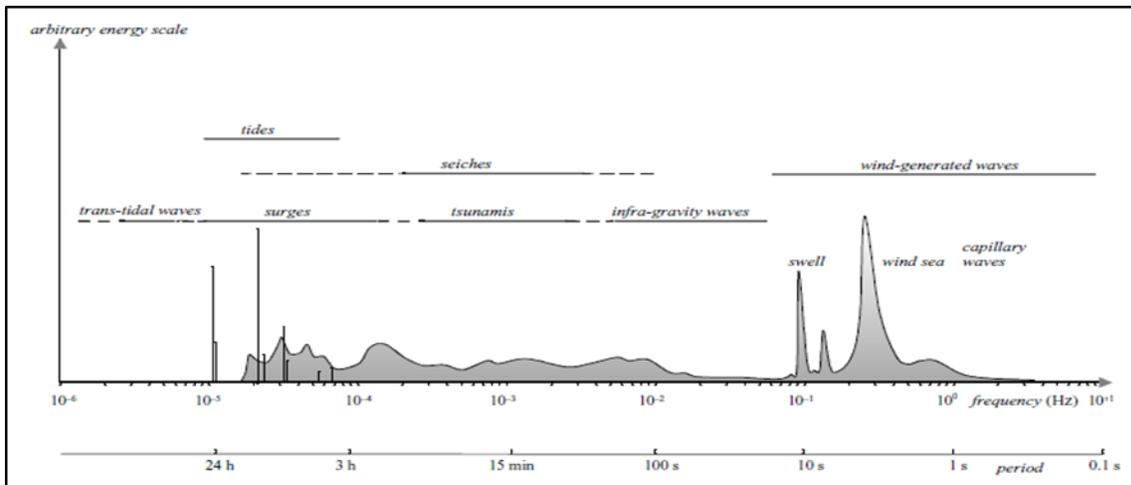


Figura 1: Escala de energía arbitraria de las olas en el océano, en función de su periodo/frecuencia asociada y el nombre que se les da. Holthuijsen (2007).

3.2. Tipos de oleaje

Como se dijo anteriormente, el oleaje se puede clasificar en dos grandes categorías: wind sea y swell. A continuación, se describirán las principales características de cada uno de ellos.

El wind sea, también llamado oleaje local, es aquel oleaje que se genera y propaga dentro del fetch y por lo tanto está influenciado directamente por la acción directa de los vientos del lugar. Este tipo de oleaje puede alcanzar valores altos de energía y normalmente tiene bajos periodos (<3 segundos) o altas frecuencias (> 2.0 Hz) (Osorio *et al.*, 2010).

El swell u oleaje generado por tormentas lejanas, es aquel que abandona el fetch y por lo tanto la influencia de los vientos que lo produjeron es casi nula. El oleaje swell puede viajar grandes distancias debido a su forma geométrica (pendientes y alturas bajas) perdiendo solo poca energía por fricción. Adicionalmente, sus periodos son altos (> 7 segundos) o tiene frecuencias bajas (< a 1.5 Hz).

En general el oleaje tipo wind sea presenta espectros de energía en una banda de frecuencia/dirección ancha. A medida que salen de la zona de generación aumenta su periodo (disminuye su frecuencia) y se convierte en oleaje tipo swell los cuales tienen espectros de energía en una banda de frecuencia/dirección estrecha.

3.3. Parámetros integrales

El oleaje se puede caracterizar a partir de valores generales de algunas de sus principales características, llamados parámetros integrales del oleaje. Estos parámetros son valores estadísticos de un estado de mar, correspondiente a un periodo de tiempo en el que se supone que las condiciones del oleaje son similares (Izaguirre, 2010). A continuación, se enuncian estos parámetros integrales.

El primero de ellos es la altura significativa del oleaje (H_{se}) la cual puede calcularse como el promedio del tercio superior de una serie de mediciones del nivel del mar (Sverdrup & Munk, 1947) o de acuerdo con la siguiente ecuación (1):

$$H_{se} = 4.004\sqrt{M_0} \quad (1)$$

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

El segundo parámetro es la frecuencia asociada al pico espectral (f) o el periodo asociado al pico espectral ($T=1/f$). Esta frecuencia se obtiene como la frecuencia asociada al valor máximo de energía del espectro de oleaje en función de la frecuencia.

Finalmente, el último parámetro integral es la dirección promedio de propagación de la energía de olas (θ). Este valor se obtiene directamente del espectro direccional del oleaje, como el valor promedio de la dirección de la energía. A continuación, se presenta una descripción de los espectros (frecuencia, dirección) mencionados.

3.4. Espectro de oleaje

Un espectro de energía del oleaje es la representación estadística de su energía, y las direcciones y frecuencias en la cual está repartida. La representación más completa de esta energía es el espectro direccional. En este caso la energía está en función de las direcciones y las frecuencias. Este espectro permite identificar desde qué dirección proviene el oleaje y qué tan amplia es la dispersión de la energía.

Al integrar el espectro direccional en función de su dirección, se obtiene el espectro del oleaje en función de la frecuencia. Este espectro es muy útil, ya que permite identificar la manera como la energía se dispersa en función de la frecuencia.

Nuevamente, al integrar el espectro en función de la frecuencia, se obtiene el primer momento del espectro (M_0) con el cual se puede calcular H_s y tiene unidades de longitud al cuadrado. Por lo tanto, H_s es una representación burda de toda la energía de las olas para un estado de mar. La representación de los parámetros o de los espectros se realiza sobre mallas en el modelo numérico.

3.5. Mallas estructuradas y mallas no estructuradas

Para un modelo numérico, una malla es una representación espacial de los sitios donde el modelo resuelve sus ecuaciones. Existen dos tipos de mallas, las estructuradas y las no estructuradas.

Una malla estructurada es aquella donde cada elemento de la representación espacial tiene el mismo número de elementos vecinos (García et al., 2009), la distancia entre nodos es la misma y por lo tanto tiene forma rectangular (Figura 1a). En una malla no estructurada, la distancia entre nodos se modifica en función de la batimetría. Entre mayor sea la profundidad, mayor es la distancia entre nodos y mientras menos profunda es la batimetría, más corta es la distancia entre nodos como se muestra en la Figura 1b.

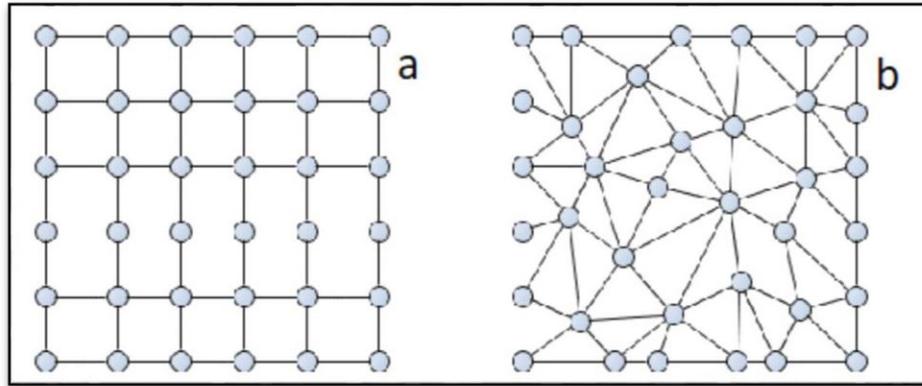


Figura 2: (a) Malla estructurada. (b) malla no estructurada. Tomado de https://www.researchgate.net/figure/On-the-left-a-structured-mesh-with-fixed-number-of-neighbors-for-cells-and-vertices-On fig2_264894615/actions#reference

Como se dijo anteriormente, el modelo que se utilizó en esta investigación es WWIII™ y tiene la capacidad de trabajar con mallas no estructuradas. A continuación, se presentan las principales características de este modelo.

3.6. Modelo WAVEWATCH III™

WAVEWATCH III™ es un modelo de tercera generación desarrollado en el National Center for Environmental Prediction (NCEP), del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Sus antecesores son WAVEWATCH I y II, desarrollados en la Universidad de Tecnológica de Delft y en el centro de vuelo Espacial Goddard de la NASA. La tercera versión difiere de sus predecesores en aspectos tales como: ecuaciones de gobierno, estructura del programa, enfoques numéricos y físicos (Tolman,1991). Este modelo resuelve la ecuación de balance de acción N la cual es función del número de onda (k), dirección (θ), espacio (x, y) y tiempo (t). La expresión se muestra en la ecuación (2):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \dot{X}N + \frac{\partial}{\partial k} KN + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

donde, el primer término representa la tasa de cambio de la acción de la ola con el tiempo. El segundo término representa el transporte espacial de la acción de la ola debido a la propagación de la onda y las corrientes medias, donde $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ y $\dot{X} = Cg + U$ (siendo Cg , la velocidad de grupo y U la componente de velocidad). El tercero y cuarto término son los cambios de la acción de la onda en términos de k y θ . El lado derecho de la ecuación representa los llamados términos fuente (S) y σ la frecuencia de la onda. Los términos fuente son: suministro de energía por parte del viento (S_{in}), interacciones no lineales (S_{nl}) y disipación por fondo (S_{ds})

4. ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado, ubicado al sur-oeste del Caribe colombiano, y se caracteriza por ser el estuario más grande del país (Figura, 3). El golfo tiene una distancia aproximada en dirección sur-norte de 80 km y en dirección este-oeste un ancho promedio de 25 km. La línea de costa tiene una distancia aproximada de 543 Km desde Cabo Tiburón hasta punta Rey (Arboletes) (García y Sierra, 2007). Presenta bajas profundidades con un promedio de 30 m y valores máximos de 80 m.

Hacia el suroeste desemboca el río Atrato formando un delta típicamente fluvial. Su caudal promedio multianual es de 2740 m³/s y los aportes promedios anuales de sedimentos de 11.26 x 106 ton/año (Restrepo y Kjerfve, 2000). Su clima está influenciado por la zona de convergencia intertropical (-ZCIT- Roldan, 2007) la cual produce un patrón bimodal estacional. El primero de ellos es la temporada seca (diciembre-abril) donde se presentan vientos Alisios fuertes del Norte y el Noroeste. Y la segunda es la temporada húmeda (mayo-noviembre) caracterizadas por vientos del Sur y Suroeste.

Los municipios costeros de Arboletes (Antioquia) y Los Córdoba (Córdoba) son los límites geográficos de los departamentos Antioquia y Córdoba. Están ubicados en el noreste del departamento de Antioquia (Figura 3). Estos municipios se encuentran ubicado entre los 8.81 ° y 8.99° de latitud norte y -76.45°y -76.36° de longitud oeste.

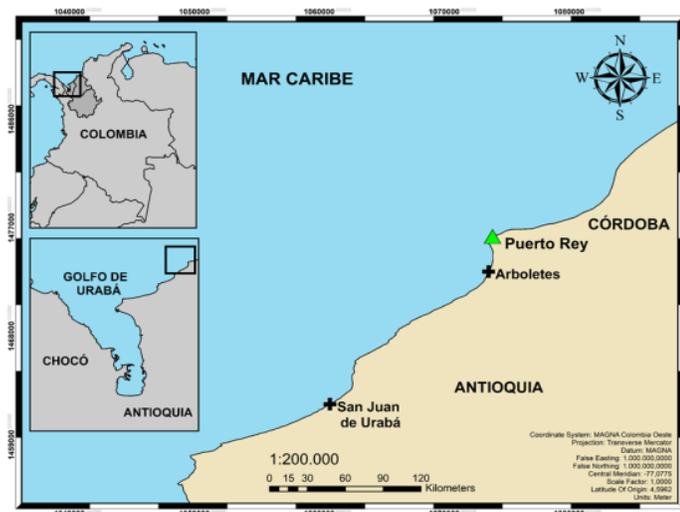


Figura 3: Área de estudio que comprende la zona costera de los municipios costeros de Los Córdoba (departamento de Córdoba) y Arboletes (departamento de Antioquia).

4.2. Información secundaria utilizada

En la implementación del modelo numérico WWIII™ fueron necesarios datos de batimetría y de información de oleaje en las fronteras de la malla. A continuación, se proporcionan detalles sobre los datos mencionados.

La información batimétrica fue obtenida de las cartas náuticas 412 y 043 elaboradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Adicionalmente, se contó con información batimétrica medida en la zona de estudio en el año 2019, obtenida por la componente de topo batimetría del proyecto “*Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*”, ASCON18-417 (Osorio, 2019) y el proyecto “PROGRAMA DE MONITOREO COSTERO EN LAS PLAYAS URBANAS INTERVENIDAS CON OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA Y EN EL VOLCÁN DE LODOS DEL MUNICIPIO DE ARBOLETES, ANTIOQUIA.” (Caicedo, 2016).

En primer lugar, se unieron las batimetrías medidas de las zonas de Puerto Rey, municipio de Arboletes, río Hobo y volcán de Lodo debido a que tenían el mismo nivel de referencia. Esta información se incorporó de manera adecuada a la batimetría de las dos cartas náuticas, cuidando que estuvieran en el mismo nivel.

Finalmente, se utilizó el método de Kriging con interpolaciones cada 20 metros mediante el uso del lenguaje de programación Python (Figura 4A). El paso siguiente fue modificar la línea de costa en la parte norte, con el fin de simular, mediante una obra costera, la espiga litoral, que existió hace casi 50 años (Rangel, 2009). La obra final tuvo una longitud de 4.2 Km desde la línea de costa hasta una roca emergida que existe en la actualidad en ese lugar (Figura 4B).

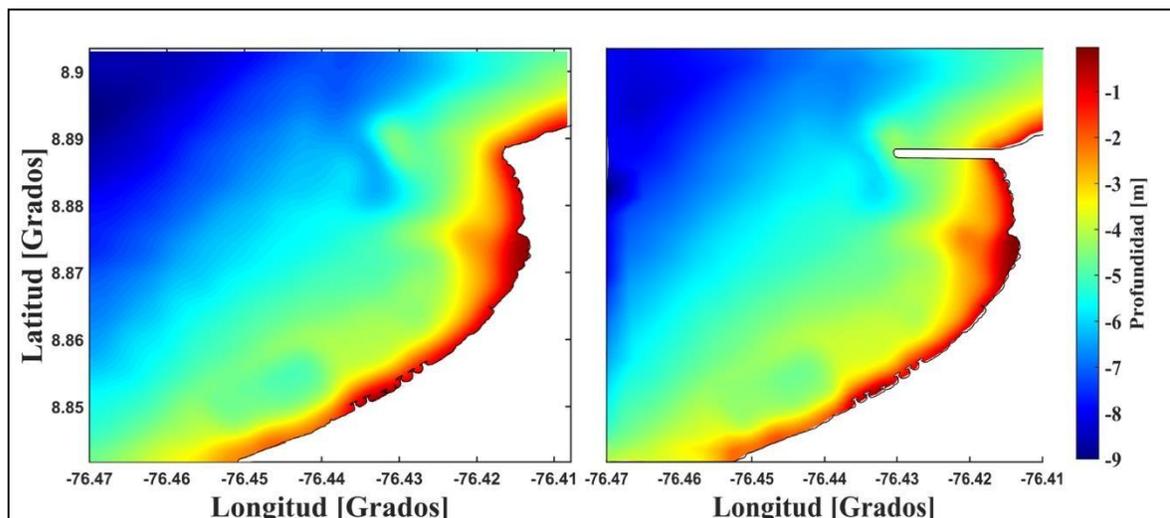


Figura 4: (A). Batimetría del área de estudio sin obra de protección costera. (B) Batimetría del área de estudio con obra de protección costera (simulando la espiga litoral).

Con el fin de forzar el modelo en las fronteras, se utilizaron los parámetros integrales del oleaje H_s , T_p y σ , así como el valor de la dispersión direccional de energía (S_{pr}) (Figura 5). Este parámetro define el intervalo de ángulos en los cuales se dispersa la energía del oleaje. Estas condiciones de frontera fueron proporcionadas por la componente de modelación del oleaje del proyecto ASCON18-417 para el periodo entre 1999 y 2017.

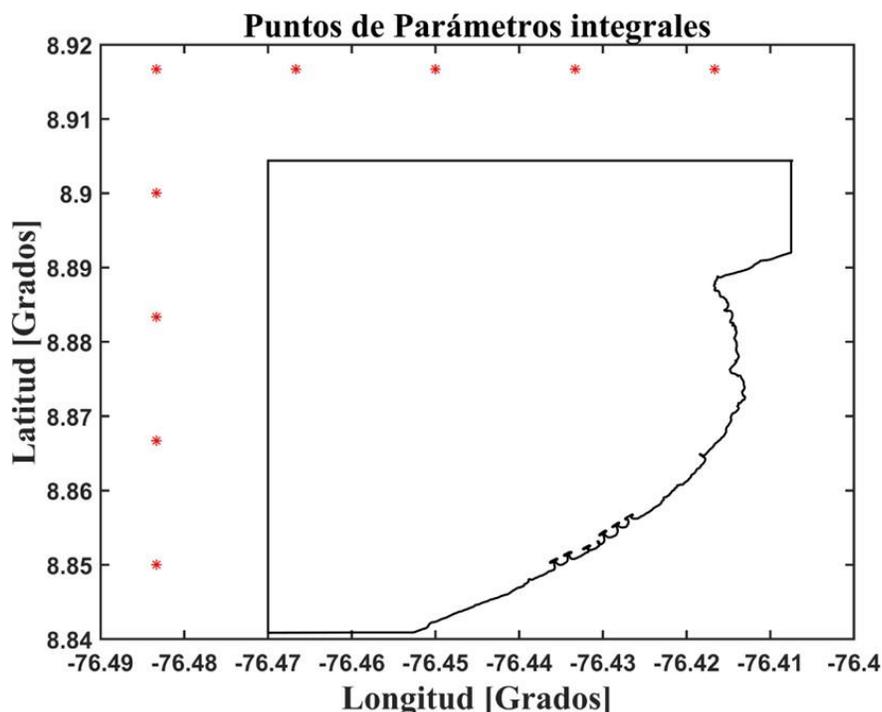


Figura 5: Ubicación de los puntos de las condiciones de frontera para al modelo WAVE WATCH IIITM

Con respecto a la línea de costa, se bajó información de varias bases de datos buscando obtener la línea de costa con mayor resolución. Sin embargo, debido al tamaño de la zona de estudio y el alcance del mismo fue necesario extraer esta información de una imagen Landsat 8 con fecha del 15 de diciembre de 2018 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Con la batimetría interpolada y la línea de costa, se procedieron a construir las mallas no estructuradas con y sin obra (espiga litoral). Para esto se utilizó el entorno gráfico del modelo DELF3D. (Figura 6).

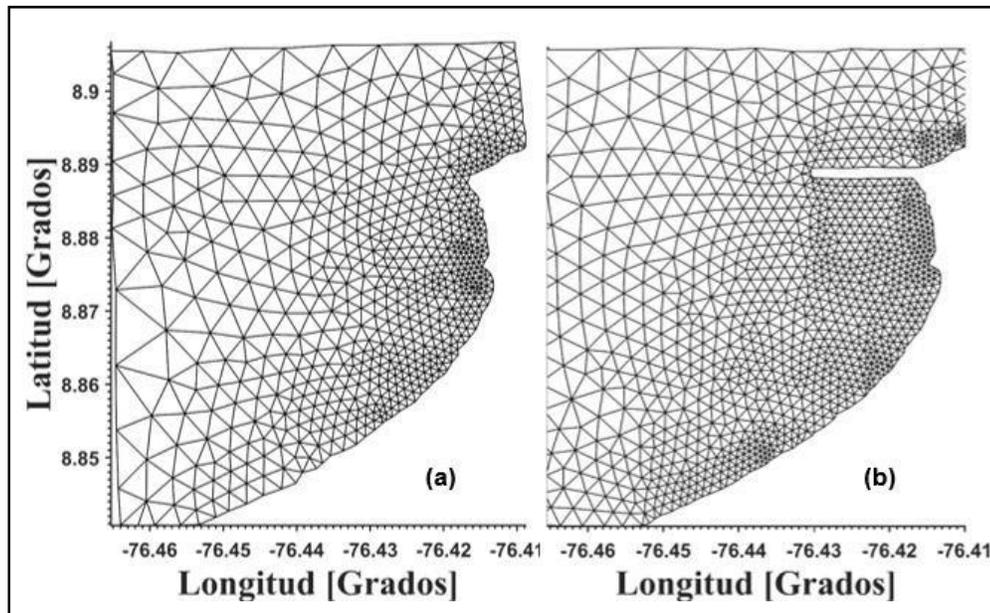


Figura 6: (a) Malla no estructurada generada a partir de la batimetría original. (b) Malla no estructurada generada a partir de la batimetría, incluye la obra de protección costera (espiga litoral).

4.3. Modelación numérica

En la implementación del modelo WAVE WATCH III™, se utilizaron las formulaciones y valores de los parámetros sugeridos por Osorio *et al.* (2016) en su estudio para el Caribe Colombiano. Es de notar que estos parámetros fueron en su momento calibrados y validados por estos autores. Las ejecuciones del modelo se realizaron en la Unidad de Cálculo Numérico Avanzado (UNICA) de la Universidad Nacional Sede Medellín.

En el modelo, se activaron las parametrizaciones del modelo relacionadas con: crecimiento del oleaje, interacciones no lineales, disipación debido a “whitecapping” (disipación en aguas profundas) y fricción de fondo. Es de notar que se escogió el periodo de tiempo de noviembre de 2018 a marzo de 2019, debido a que es la época más reciente de modelación que se tiene y además porque está enmarcada en la época seca donde se generan las mayores alturas de olas. En la Tabla 1 se presenta un listado de las principales características y parametrizaciones utilizadas en el modelo.

Tabla 1. Formulaciones y parametrizaciones utilizadas en el modelo

Características / Parametrización	Descripción
Resolución espacial de la malla	Mínima=90 m Máxima=300 m
Área de estudio	(-77.46 - 76.41)°W y (8.40-8.889)°N
Periodo de simulación	Noviembre de 2018 hasta marzo de 2019
Pasos de tiempo	Paso de tiempo global: 900s Espacio x-y: 600s Propagación espectral: 600s Integración término fuentes y sumidero: 300s
Condiciones de contorno	Hs, Fp, σ y Spr
Datos de salida	Hs, Fp, σ y Wnd (Velocidad media del viento)
Formulaciones utilizadas	<p>Whitecapping:</p> <p>Fricción de fondo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Constantes de alta frecuencia: 4.8, 0.170E-03 Y 2 <input type="checkbox"/> Constantes de alta frecuencia: 0.3E-3 y 0.47 <input type="checkbox"/> Entrada mínima de frecuencia pico: 0.009 <input type="checkbox"/> PHI mínimo: 0.003 <p>Interacciones no lineales</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Lambda:0.25 <input type="checkbox"/> Prop. contante: 0.1E8 <input type="checkbox"/> Factor de conversión (kd): 0.74 <input type="checkbox"/> Kd mínimo: 0.5 <input type="checkbox"/> constantes de aguas poco profundas: 5.5, 0.83 y 1.25

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

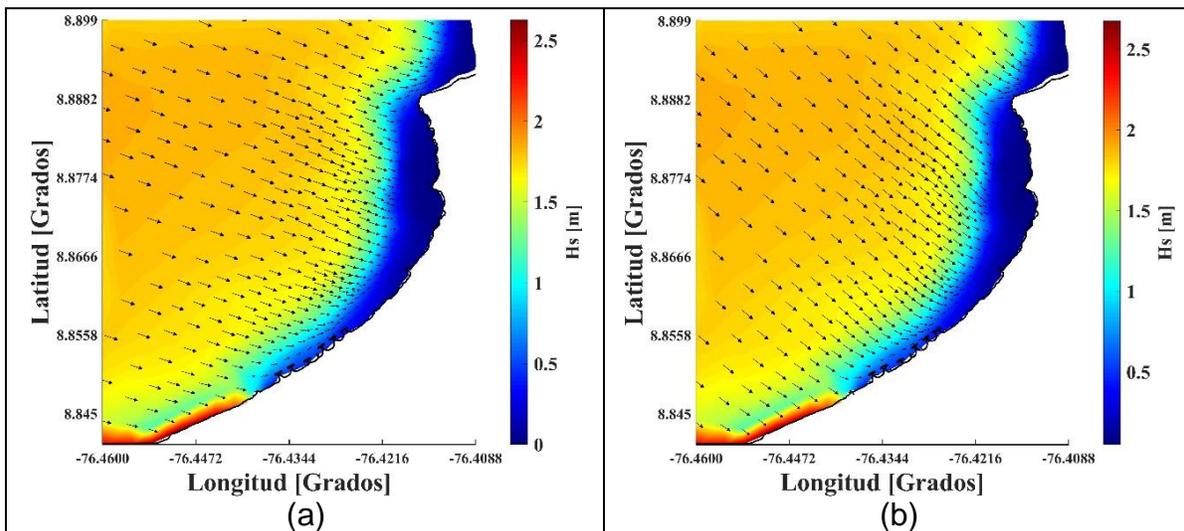
Los resultados que se presentan a continuación están relacionados con los campos espaciales de oleaje. De igual manera se hicieron análisis estadísticos del campo completo de olas.

5.1. Resultados sin obras

En la figura 7 se muestra el campo de olas (direcciones y alturas) promedio mensual de los cuatro meses de estudio (noviembre a marzo) y campo promedio de todo el periodo de tiempo analizado. En este caso se plantea el escenario sin la obra de protección (espiga litoral).

Los campos de H_s y θ se presentan para los meses de diciembre a febrero, en las Figuras (7a,b y c), respectivamente. En los meses de diciembre, enero y febrero el oleaje se propaga hacia la línea de costa con direcciones predominantes desde el noroeste con un valor promedio de altura de ola significativa de 1.0 m. Respecto a la dirección es hacia el este en diciembre, y de enero a febrero gira un poco más hacia el sur.

Los resultados sugieren que el campo promedio para el periodo completo de modelación (Figura 7d), tiene valores de H_s cercanas a cero y hasta 2.5 m. Los valores máximos de altura de ola significativa se encuentran en aguas más profundas y al sur del municipio de Arboletes. Estos últimos valores probablemente se presentan debido a la refracción del oleaje producida por las obras protección costeras ubicadas en ese lugar. En este caso, los valores de H_s disminuyen a medida que el oleaje se propaga hacia la línea de costa. En este recorrido, el oleaje experimenta procesos de asomeramiento influenciados por los cambios en la batimetría.



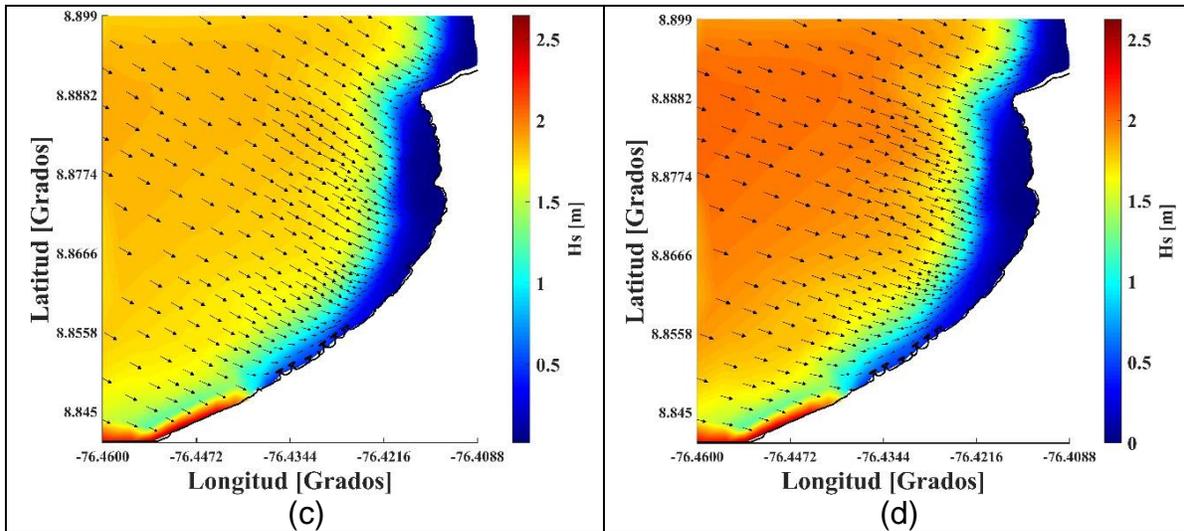


Figura 7: Campo promedio mensuales de direcciones y altura de olas significantes sin obra para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019, (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (Diciembre-febrero).

Se realizó un análisis estadístico de los campos de oleaje analizados. En la Figura 8, se presentan histogramas de altura y dirección del oleaje para el caso sin obras de protección costera. En las Figuras 8 a, b, c se muestran los resultados de los campos de los meses de diciembre a febrero, respectivamente. Se observa como la dirección del oleaje en los meses de diciembre, enero y febrero tiene un predominio hacia el este con una frecuencia de 110, 116 y 121 respectivamente. Los valores de H_s entre 0.6 y 0.9 m presentaron mayores valores de frecuencias (62, 64 y 67) respectivamente

Para el campo promedio de todo el periodo de simulación (Figura 8d), se encontró que para el periodo de estudio la dirección del oleaje tenía un predominio hacia el este con una frecuencia de 106. Mientras que las alturas de olas significantes entre 0.6 y 0.9 presentaron mayores frecuencias (60).

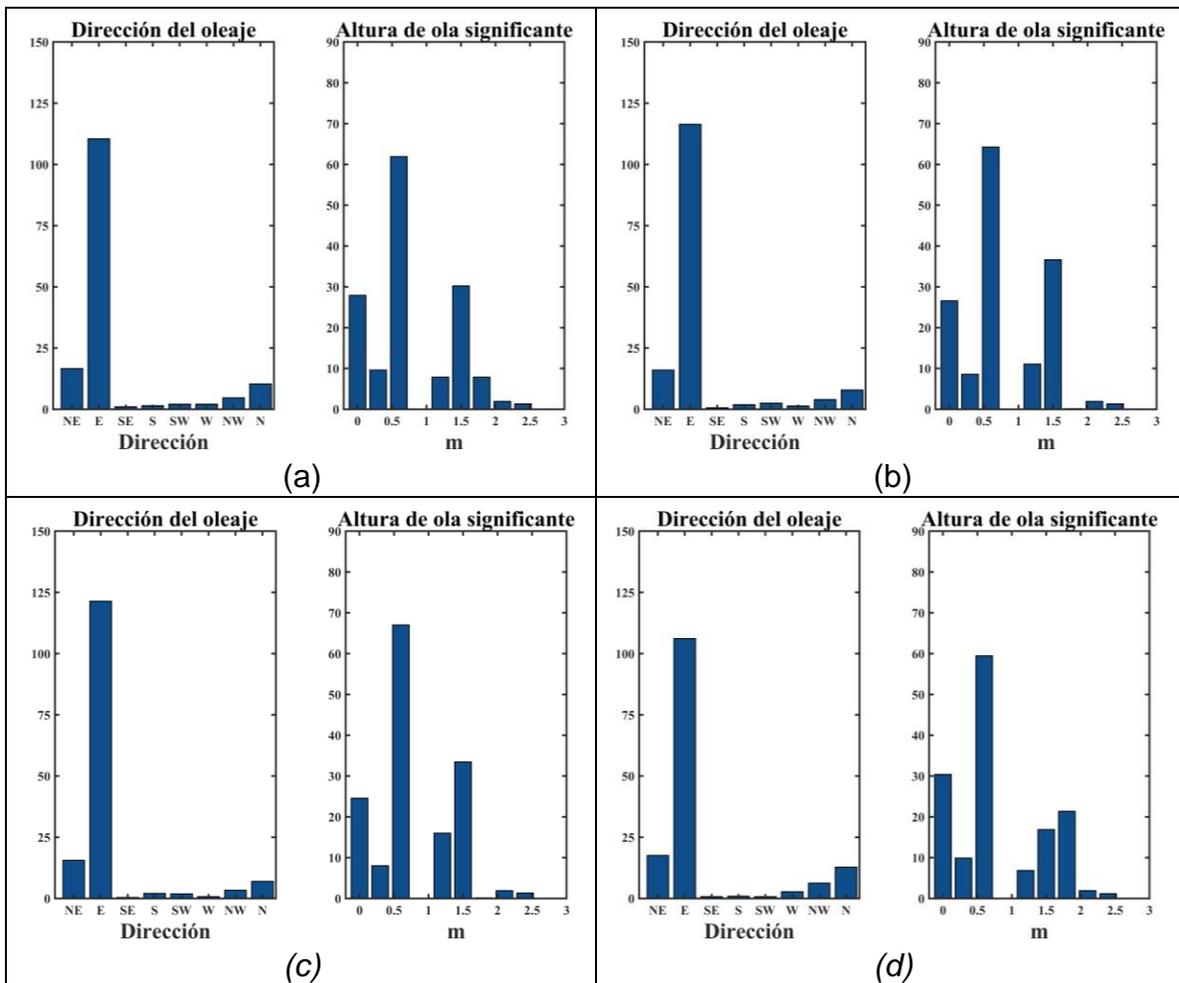


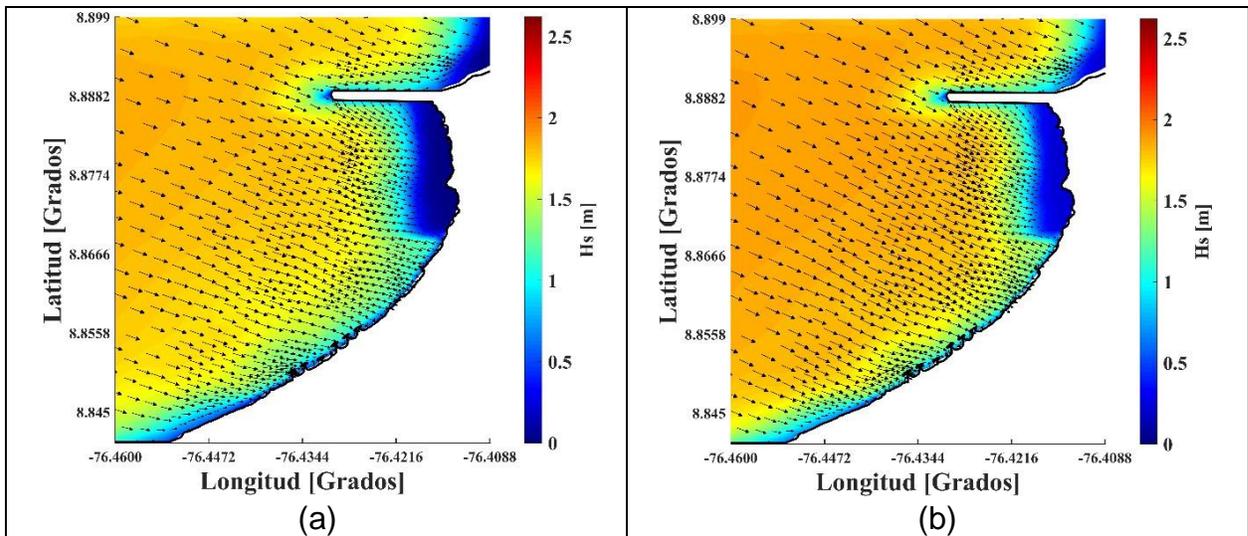
Figura 8: Histogramas del campo promedio mensual de direcciones y altura de olas significantes sin obras para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019 y (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (diciembre-febrero).

5.2. Resultados con la obra (espiga litoral)

Con el fin de analizar la dinámica del oleaje que puede causar la construcción de una posible obra de protección costera que simula la antigua espiga litoral, se realizaron simulaciones numéricas para el periodo mencionado. En La figura 9 se observan los campos promedio de Hs y \bar{u} en el área de estudio. En este caso se plantea el escenario con la obra de protección (espiga litoral).

Los campos de Hs y \bar{u} se presentan para los meses de diciembre a febrero, en las Figuras (9 a, b y c), respectivamente. En los meses de diciembre, enero y febrero el oleaje se propaga hacia la línea de costa con direcciones predominantes desde el noroeste con un valor promedio de altura de ola significativa de 1.5, 1.3 y 1.7 m respectivamente

Para el campo promedio de Hs y \bar{u} para todo el periodo de modelación entre diciembre y febrero (Figura 9d), los resultados sugieren que los valores de alturas de ola significantes van desde cero hasta 2.0 m. Los valores máximos de altura de ola significativa se encuentran en aguas más profundas. En este caso, los valores de Hs disminuyen a medida que el oleaje se propaga hacia la línea de costa. Sin embargo, es de notar como se presentan valores más altos cerca de la línea de costa entre el sitio de volcán de lodos y rio Hobo.



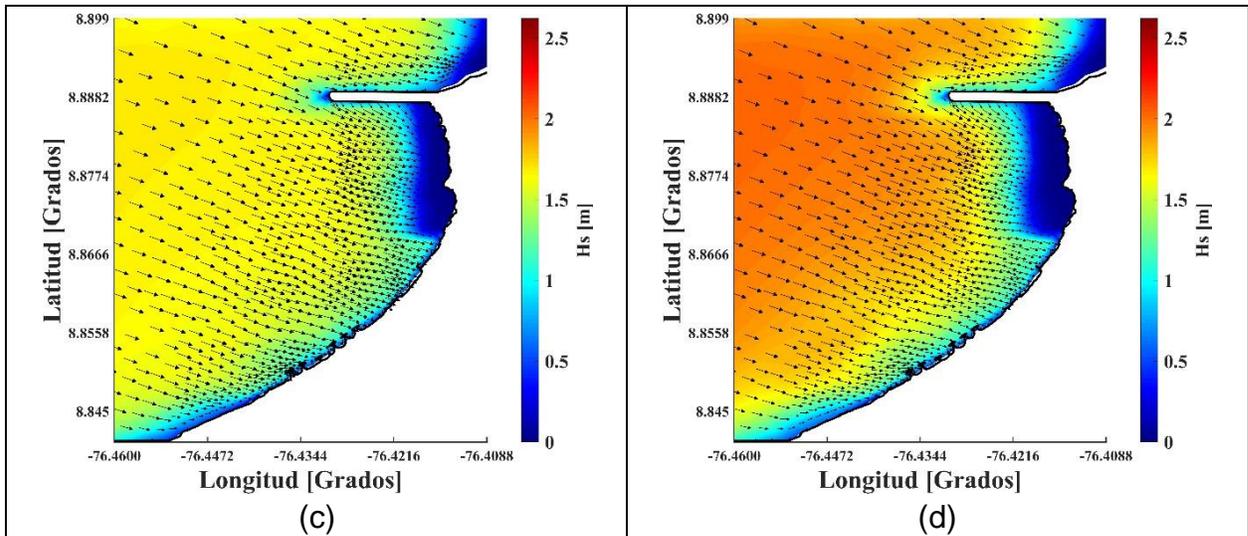


Figura 9: Campo promedio mensuales de direcciones y altura de olas significantes con obra para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019, (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (diciembre-febrero)

Es de notar que los valores de la altura significativa se incrementan en la línea costa desde la zona de volcán de lodos hasta rio Hobo para el caso con obras. Este comportamiento no se debe a los valores de batimetría, ya que esta solo se modificó en el lugar cercano a la obra (a 1km del lugar mencionado).

Al revisar la configuración de la malla no estructurada de los dos casos, se observa como los nodos no coinciden espacialmente. De manera específica, para en la zona mencionada los nodos son mucho más densos para el caso con obra. Al modelo tratar de resolver valores en mallas más pequeñas podría producir errores si no cuenta con la información batimétrica adecuada. Este comportamiento también se podría haber generado por el uso de información batimétrica de diferentes épocas.

Para el campo promedio de los parámetros mencionados durante todo el periodo de modelación, se encontró que para el periodo de estudio la dirección del oleaje predominaba hacia el este (144), seguido del noreste (8). En el caso de Hs los valores más frecuentes son cercanos a 0.5 m (80), seguidos de valores cercanos a 1.7m (25).

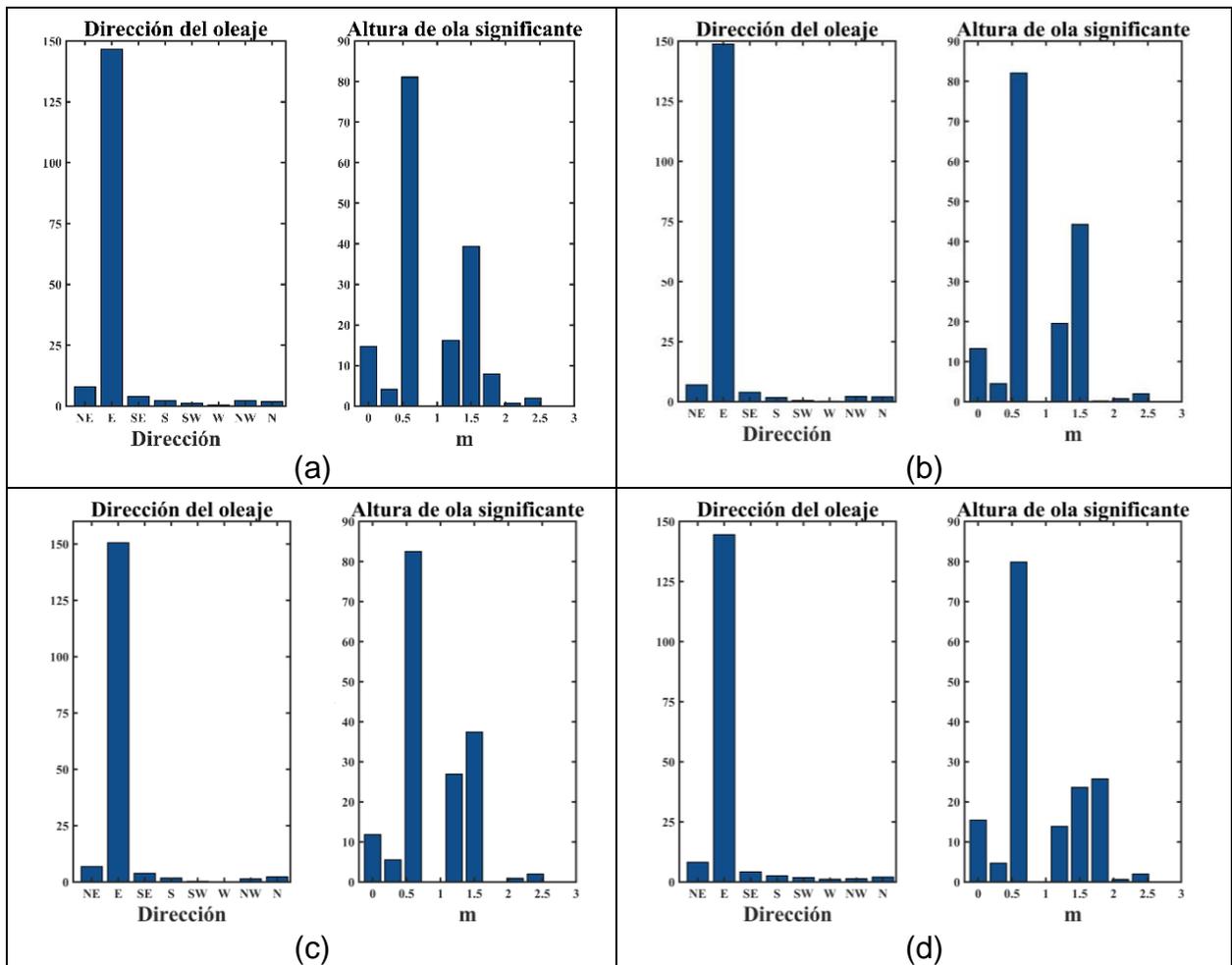


Figura 10: Histogramas del campo promedio mensual de direcciones y altura de olas significantes sin obras para: (a) diciembre de 2018, (b) enero de 2018, (c) febrero de 2019 y (d) promedio de todo el periodo de tiempo analizado (diciembre-febrero).

Se realizó una comparación de los campos de Hs con y sin obras con el fin de conocer las zonas en las que el oleaje se veía incrementado/disminuido. Esto solo se realizó para los campos promedios de todo el periodo de estudio. Para esto se calculó el porcentaje de la diferencia relativa (P_{dr}) entre el campo sin (H_{sin}) y con obra (H_{con}) (ver ecuación 3). El campo resultante se puede observar en la Figura 11.

$$P_{dr} = \frac{H_{sin} - H_{con}}{H_{sin}} \times 100 \quad (3)$$

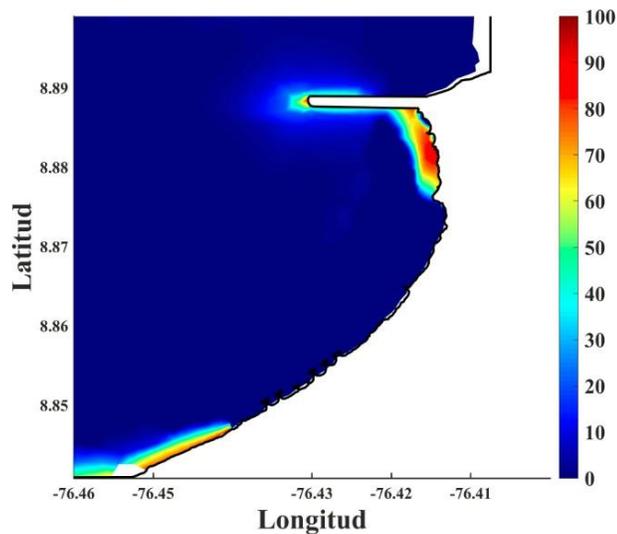


Figura 11: Campo de Hs resultante a partir de la expresión (3).

Los valores del porcentaje de la diferencia relativa entre los campos sin y con obra, muestran en general valores menores al 10% en gran parte de la zona de estudio. Son embargo, cerca de río Hobo y del lugar sugerido para la obra se presentan diferencias > 40%.

En el caso de la zona de río Hobo, la diferencia se debe a valores de Hs que son mayores para el caso sin obra. Este resultado sugiere que la posible construcción de la obra si puede tener una disminución de los valores de la altura del oleaje en este lugar. Es de notar la zona de río Hobo en dirección oeste, sufre en este momento de procesos intensos de erosión (Toro *et al.*, 2019).

De otro, lado en la zona de la posible construcción de la obra las diferencias se presentan debido a valores de Hs menores para el caso con obra. Este resultado sugiere que la obra podría generar sobre esta zona, disminuciones importantes de la altura de ola y por consiguiente mitigación de los procesos erosivos.

6. CONCLUSIONES

Los experimentos realizados permitieron analizar la influencia de que tenía una posible obra de protección costera sobre la energía del oleaje en el municipio de Arboletes.

Los resultados obtenidos durante esta investigación, nos muestran el comportamiento espacial de los campos promedios de la altura de ola significativa en Punta Rey. En general el valor de dirección del oleaje para los meses estudiados es hacia el este. Los valores promedio de Hs se incrementan desde diciembre (1.0 m) hasta febrero (2.5 m).

Se evidencio cómo la implementación de una obra de protección costera modifica de manera importante la dinámica del oleaje alrededor del sitio de la obra y en lugares como rio Hobo. La implementación de una obra de protección costera provoca una disminución de la energía del oleaje en esos lugares.

Sin embargo, es de notar, que la configuración de las mallas y la información batimétrica de diferentes épocas, podría estar generando valores mayores de Hs cerca de la línea de costa entre el volcán de lodo y rio Hobo. Los resultados en este sentido deben ser tomados con precaución y tenidas en cuenta las recomendaciones que se darán.

Por último, la capacidad de computo de los modelos de tercera generación de trabajar con mallas no estructuradas lo sitúan como una de las mejores opciones para el análisis de fenómenos costeros. Estas opciones permiten tener una mejor resolución espacial de los datos cerca de la línea de costa.

7. RECOMENDACIONES

- En trabajos futuros se recomienda realizar experimentos con mallas estructuradas y compararlos con las no estructuradas. Esto con el fin de comparar el desempeño computacional del modelo y los parámetros integrales del oleaje.
- Realizar una campaña batimétrica de toda la zona costera entre punta Rey y rio Hobo.
- Adicionalmente, se recomienda realizar una validación de estos resultados con mediciones *in situ* y así validarlos de manera adecuada.

8. REFERENCIAS

- Agudelo, P., Restrepo, A.F., Molares, R., Tejada, C.E., Torres, R., y Osorio, A.F. Determinación del clima medio y extremos en el Caribe colombiano. Cartagena, Colombia. Boletín científico del CIOH. (2005). 23. 33-45.
- Correa, I.D., Vernet, 2004, INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE LA EROSIÓN LITO RALEN URABÁ (SECTOR ARBOLETES - TURBO) COSTA CARIBE COLOMBIANA, Boletín invermar.
- Caicedo, A., (2016). Zona de estudio de Arboletes. Proyecto " PROGRAMA DE MONITOREO COSTERO EN LAS PLAYAS URBANAS INTERVENIDAS CON OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA Y EN EL VOLCÁN DE LODOS DEL MUNICIPIO DE ARBOLETES, ANTIOQUIA."
- Dagua, C.J., Lonin, S., Urbano, C.P., Orfila, A. Calibración del modelo SWAN y validación de reanálisis del oleaje en el Caribe. Boletín científico CIOH. (2013) 31:12-28.
- García, Palacio, C., García, U., Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. Dyna, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. junio, (2008). vol. 76, núm. 157, pp. 17-25.
- García, C. y P. Sierra. Un golfo en el Caribe Colombiano: 13-21. En: García-Valencia, C. (Ed). Atlas del golfo de Urabá: Una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR y Gobernación de Antioquia, Santa Marta. (2007) 180 p.
- González, L. El clima de olas en el Mar Caribe entre Santa Marta y Bocas de Ceniza. (1990). Revista Ríos y costas No2. Horrtillo, C.J., Maza, C.M., y Rejtman, O.P. Análisis de oleaje para la zona del Caribe colombiano con información escasa. Universidad de Cartagena – Instituto de hidráulica y Saneamiento Ambiental. (2000). I.H.S.A., pp. 10-11.
- Horrtillo, C.J., Maza, C.M., y Rejtman, O.P. Análisis de oleaje para la zona del Caribe colombiano con información escasa. Universidad de Cartagena - Instituto de hidráulica y Saneamiento Ambiental. (2000). I.H.S.A., pp. 10-11.
- Inger, D., Higgins, A., Ayala, C., Martínez, P., Tigreros, P., Muñoz, A. Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia. Bol. Cient. CIOH; (2015). 33:231-244.

- Izaguirre, C., Méndez, J.F., Menendez, M., y Luceño, A. Extreme wave climate variability in southern Europe using satellite data. (2010). *Journal of geophysical research*, vol. 115, doi:10.1029/2009JC005802.
- Londoño, W. 2018. Cambio en el espectro del oleaje que ingresa al Caribe Colombiano debido a la presencia de las Antillas Menores. Trabajo de grado en Oceanografía, Corporación Académica Ambiental, UdeA.
- Lonin, S., Lonina, I., y Tuchkovenko, Y. S. Utilización del modelo Nedwam para el cálculo y pronóstico del oleaje en el Mar Caribe. *Boletín Científico CIOH No. 17*, Cartagena de Indias, Colombia. (1996). ISSN 0120-0542, pp. 37-45.
- Montoya, R.D., Osorio, A.F., Montoya, L.J., Hernández, J.C. Interacción océano-atmósfera en el mar Caribe: relación con los patrones de oleaje,. editor Leonardo David López Escobar. –1ª ed. – Medellín: Universidad de Medellín; Sello Editorial Universidad de Medellín, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, (2015), ISBN: 978-958-8922-35-5.
- Orejana, A., Otero, L., Dagua, A., Marriaga, L., y Herrera E. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*, (2013). 31:109-124.
- Ortega, S., Osorio, A. F., Agudelo, P., y Vélez, J. I. Generación de series sintéticas de oleaje en lugares con instrumentación escasa en el mar Caribe colombiano. Libro de resúmenes extendidos del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este. Uruguay. (2010). 11 p.
- Ortega, S., Osorio, A. F., y Agudelo, P. Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renewable Energy*, (2013). 57, 240-248.
- Ortiz, J.C., Otero, L.J., Restrepo, J.C., Ruiz, J., Cadena, M. Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Nat. Hazards* (2013). 13, 2797-2804.
- Osorio, A.F., Mesa, J.C., Bernal, G.R., y Montoya, R.D. Reconstrucción de uarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). (2009). *Boletín Científico CIOH No. 27*. p 37-56.
- Osorio, A.F., Gómez, A., Molina, L., Álvarez, O., y Osorio, J. 2010. Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local. Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEÁNICOS), Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. NOVIEMBRE.

- Osorio, A., F., Molina, L., G., y Osorio J., D. Caracterización hidrodinámica del oleaje local (SEA) y de fondo (SWELL) en el golfo de Urabá. (2016 B). Pag 773-1044. En: Blanco-Libreros, J. F. & M. H. Londoño-Mesa (Eds.). Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano. Bogotá.
- Osorio, A.F., Montoya, R.D., Ortiz, J.C., Peláez D. Construction of synthetic ocean wave series along the ColombianCaribbean Coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research* (2016 A), 56,119–131.
- Osorio, A.F, (2018). Zona de estudio Volcán de Lodo. Recuperado de: componente de Modelación del oleaje. Proyecto " Investigación para la reversión del proceso de erosión de las costas del mar de Antioquia"
- Padilla, S. 2018. Análisis espectral del oleaje en el litoral antioqueño por medio de modelación numérica. Trabajo de grado en Ing. Oceanográfica, Facultad de Ingeniería, UdeA.
- Rangel. Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe Colombiana. *Gestion y medio ambiente*. (2009). 12. 43-56
- Rangel, N,G., Anfuso, G., Williams, A,T. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes,causes and management. *Ocean & Coastal Management* (2015). 114, 129-144.
- Restrepo, J.D. y B. Kjerfve, Water discharge and sediment load from the Western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *Journal of Geology*, (2000) 108. pp 1733.
- Restrepo, J.C., Otero, L., Casas A.C., Henao, A., Gutiérrez, J. Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia), *Ocean & Coastal Management* (2012). 69,133-142
- Roldan, P. A. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia. Golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis recursos hidráulicos, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. (2007), 102p.
- Sverdrup, H., y Munk, W. Wind, sea and swell: theory of relation for forecasting. H. O. Publication 601. U. S. Naval Oceanographic Office. Washington, D.C. (1947).

- Tolman, H.L. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depth and currents. *Journal of Physical Oceanography*. (1991). pp 21: 782–797.
- Tolman, H.I. 2014. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note, 151, 97. Tomaich, G.T.,1995, A Genuinely Multi-dimensional Upwinding Algorithm for the Navier-Stokes Equations on Unstructured Grids Using a Compact, HighlyParallelizable Spatial Discretization, Ph.D. Thesis, University of Michigan, U.S.A.,.
- Toro, V.G; Calderon, J.M; Murillo, K.J; Londoño, G.S. 2019. Informe componente de modelación de Transporte de Sedimentos. Proyecto " Investigación para la reversión del proceso de erosión de las costas del mar de Antioquia". Universidad de Antioquia.
- Tovar, M.F., Yamá, L.F. Análisis de prefactibilidad para la generación de energía eléctrica mediante energía undimotriz en Tumaco (Nariño). Universidad de La Salle, Bogotá D.C, Colombia. (2009).
- Universidad de Cantabria, grupo de ingeniería oceanográfica y de costas (g.i.o.c.), ministerio de medio ambiente, dirección general de costas. Documento de referencia, (2000). volumen i, dinámicas Santander.
- Wei-Cheng W., Zhaoqing Y., Taiping W., 2018, Wave Resource Characterization Using an Unstructured Grid Modeling Approach, *energies*, 11, 105.