

Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá

Mean and extreme wave climate determination at the north of the Golfo de Urabá

Fecha de recepción: 2013-08-13 / Fecha de aceptación: 2013-10-24

Andrés Fernando Orejarena Rondón ¹, Luis Jesús Otero Díaz ², Claudia Janeth Dagua Paz ¹, Leonardo Marriaga Rocha ¹, Enovaldo Herrera Meléndez ³.

¹**Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH).** Barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Bolívar, Colombia. Tel: +57(5) 669 44 65. Correo electrónico: AOrejarenaRondon@dimal.mil.co ; cdagua@dimar.mil.co, lmarriaga@dimar.mil.co.

²**Universidad del Norte (Uninorte).** Departamento de Física, Grupo de Física Aplicada-Oceanografía Física, Barranquilla. Correo electrónico: ljotero@uninorte.edu.co.

³**Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.** Correo electrónico: ejherreram@unal.edu.co.

Orejarena, A.F., Otero, L.J., Dagua, C.J., Marriaga, L. y Herrera, E. 2013. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá. Bol. Cient. CIOH (31): 109-124.

RESUMEN

Con el fin de evaluar diferentes escenarios oceanográficos en el extremo norte del Golfo de Urabá, se validó y determinó el clima de oleaje medio y extremal a partir de una serie de oleaje sintético de once años, obtenido del modelo global de oleaje WaveWatch III. La serie de altura de oleaje (Hs) fue ajustada a diferentes funciones de distribución de probabilidad (Weibull de mínimos, Normal, Log-normal, Gumbel de máximos), encontrando que ésta se ajustaba mejor a la función de distribución Weibull de mínimos, al igual que la serie de periodo pico (Tp). Se encontraron alturas de ola de 1,13 y 2,5 m que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 95 %, respectivamente. Esta serie de oleaje de once años se ajustó a la función de máximos de Gumbel para definir los regímenes extremales obteniendo valores de altura de ola de 4,9 m para periodos de retorno de 100 años. Los resultados de la presente investigación son de relevancia para el posterior análisis de la evolución morfológica del Golfo de Urabá; así como para el diseño, funcionalidad y estabilidad de obras de ingeniería sobre el borde costero.

PALABRAS CLAVES: Golfo de Urabá, WaveWatch III, régimen medio de oleaje, régimen extremal de oleaje.

ABSTRACT

The average and extreme wave climate at north of the Gulf of Urabá was evaluated and determined from 11 years of synthetic wave serie derived from the global model surf WaveWatch III, in order to evaluate different oceanographic scenarios. The series of wave height (Hs) was adjusted to different probability distribution functions (minimum of Weibull , Normal, Log- Normal , maximum of Gumbel) , finding that the minimum of Weibull had better fit; the same happened for the number of peak wave period (Tp) . Waves heights were found from 1.13 and 2.5 m, wich correspond to probability of non exceedance of 50 % and 95% respectively. The waves series of 11 years was fixed to the maximum of Gumbel function to define extremal regimes and a wave height value of 4.9 m was obtained for return period of 100 years. These results are relevant to the subsequent analysis of the morphological evolution of the Gulf of Urabá, as well as for the design, functionality and stability of engineering works on the waterfront

KEY WORDS: Gulf of Uraba, WaveWatch III, average wave regime, extreme wave regime.

INTRODUCCIÓN

El oleaje depende de parámetros atmosféricos, morfológicos e hidrodinámicos que influyen en el modelamiento de las costas y transporte de sedimentos [1], por lo cual el conocimiento de estos parámetros es indispensable para comprender mejor los procesos costeros presentes en las diferentes playas del litoral colombiano, debido a que influyen de manera directa en las decisiones relacionadas con estudios de estabilización de playas, desarrollo turístico y protección de ecosistemas naturales [2].

En el Golfo de Urabá no se han llevado a cabo estudios detallados sobre estos factores oceanográficos y climatológicos que influyen en la intensidad e incidencia del oleaje sobre sus playas, por lo cual fué necesario determinar el clima de oleaje medio y extremo en el extremo norte del Golfo de Urabá, de manera que sus resultados sirvan como parámetros o condiciones de entrada para modelos de tercera generación de evolución morfológica y transporte de sedimentos.

Trabajos como el desarrollado por [3], donde se determina el régimen medio y la probabilidad conjunta entre altura y periodo de oleaje en aguas profundas mediante datos visuales de barcos en ruta ICOADS [3, 4] o el desarrollado por [5], los cuales presentan una propuesta estadística para determinar oleaje, basada en observaciones visuales de oleaje y viento recopiladas por la *British Maritime Technology Limited* (BMTL, por sus siglas en inglés) en la publicación *Global Waves Statics* (GWS, por sus siglas en inglés), tienen limitaciones debido a la falta de validación por medio de comparación con datos medidos por instrumentos *in situ*.

La utilización de modelos numéricos de oleaje permitió que [6] determinara el transporte de sedimentos debido a corrientes generadas por oleaje en playas del Caribe colombiano y que [7] calculara un pronóstico de oleaje en el Mar Caribe colombiano mediante la utilización del modelo NedWAM.

Por su parte, [8] mediante el modelo de tercera generación WaveWatch III [9, 10] analizó datos sintéticos de oleaje, propagán-

dolos hacia diferentes puntos del litoral Pacífico utilizando un modelo simplificado basado en la teoría del rayo, con el fin de determinar la cota de inundación integrando datos de marea y oleaje. Años después, [11] determina los regímenes medios y extremos de oleaje en el Caribe colombiano a partir de ecuaciones determinadas mediante la comparación de datos visuales de oleaje con datos de oleaje escalar.

Trabajos como los desarrollados por [12] y [2] validan los resultados obtenidos con modelación numérica con datos instrumentales, uno en el Pacífico y el otro en el Caribe. Los dos utilizaron el modelo numérico WaveWatch III (WWIII) para determinar datos de oleaje con buenos resultados. A pesar de que en el trabajo realizado por [2] se simula oleaje para el Caribe colombiano, sólo se determinaron puntos virtuales de oleaje en La Guajira, Barranquilla y el Golfo de Morrosquillo.

Debido a que los instrumentos de medición de oleaje instalados en el borde costero colombiano no cuentan con series de oleaje con adecuada resolución temporal para determinar el clima de oleaje, para de esta manera establecer parámetros importantes utilizados en la investigación de la evolución morfológica sobre las costas del litoral Caribe colombiano, se utilizaron datos de oleaje disponibles en la página del servicio meteorológico de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, por sus siglas en inglés) <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml>, generados utilizando datos de re-análisis y el modelo de tercera generación WaveWatch III [9, 10], ofreciendo datos globales de oleaje en diferentes mallas computacionales.

En la presente investigación se extrajeron once años de datos de oleaje de la malla del Atlántico Norte y de ella, un punto en el extremo norte del Golfo de Urabá, el cual fue validado con datos de oleaje pertenecientes a una boya de oleaje direccional del Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Smpom-Dimar) ubicada en el área de estudio. Posteriormente se evaluaron condiciones de oleaje (regímenes medios y extremos) de manera que estos resultados puedan ser utilizados como condiciones

de frontera dentro de un análisis de variación morfológica y transporte de sedimentos en el Golfo de Urabá.

ÁREA DE ESTUDIO

El Golfo de Urabá (Figura 1) es un cuerpo de agua semicerrado, se encuentra ubicado en la parte suroeste de la costa Caribe colombiana. Tiene aproximadamente 80 km de largo por 25 km de ancho [13] y constituye la última gran geoforma costera de este borde costero, ya que limita directamente con Panamá. Lo conforman los departamentos de Antioquia y Chocó, ubicándose entre las latitudes $7^{\circ}54'17''N$ y $8^{\circ}40'27,14''N$ y entre las longitudes $76^{\circ}45'8,68''W$ y $77^{\circ}21'15,13''W$. El Golfo de Urabá se caracteriza por presentar un clima cálido-húmedo. Presenta temperaturas medias superiores a $24^{\circ}C$ y constantemente precipitaciones debido a la influencia de un sistema de baja presión [14].

Asimismo, en época húmeda la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), se man-

tiene oscilando latitudinalmente sobre los $5^{\circ}N$ y $11^{\circ}N$. Durante época seca la influencia de este sistema es menor [14]. Por consiguiente, el Golfo de Urabá tiene dos temporadas climáticas bien definidas: una temporada seca con fuertes vientos Alisios del Noreste provenientes del Mar Caribe, cuando la ZCIT se encuentra al sur entre diciembre y febrero; y una temporada húmeda con vientos Alisios del Suroeste, cuando la ZCIT se encuentra más al norte entre mayo y noviembre [15].

En lo que respecta a la batimetría (Figura 1), se puede decir que en general el Golfo de Urabá es somero, en la parte sur las profundidades se encuentran entre 15 y 20 m, mientras que en la parte media las profundidades se encuentran en su mayoría entre 20 y 40 m, haciéndose más profundo hacia su entrada y contacto con el Mar Caribe. En el borde Este de su entrada, se aprecia una zona amplia de bajas profundidades, que podría afectar los procesos físicos de asomeramiento y refracción del oleaje en la medida que éste se propague de la direcciones NNE y NE.

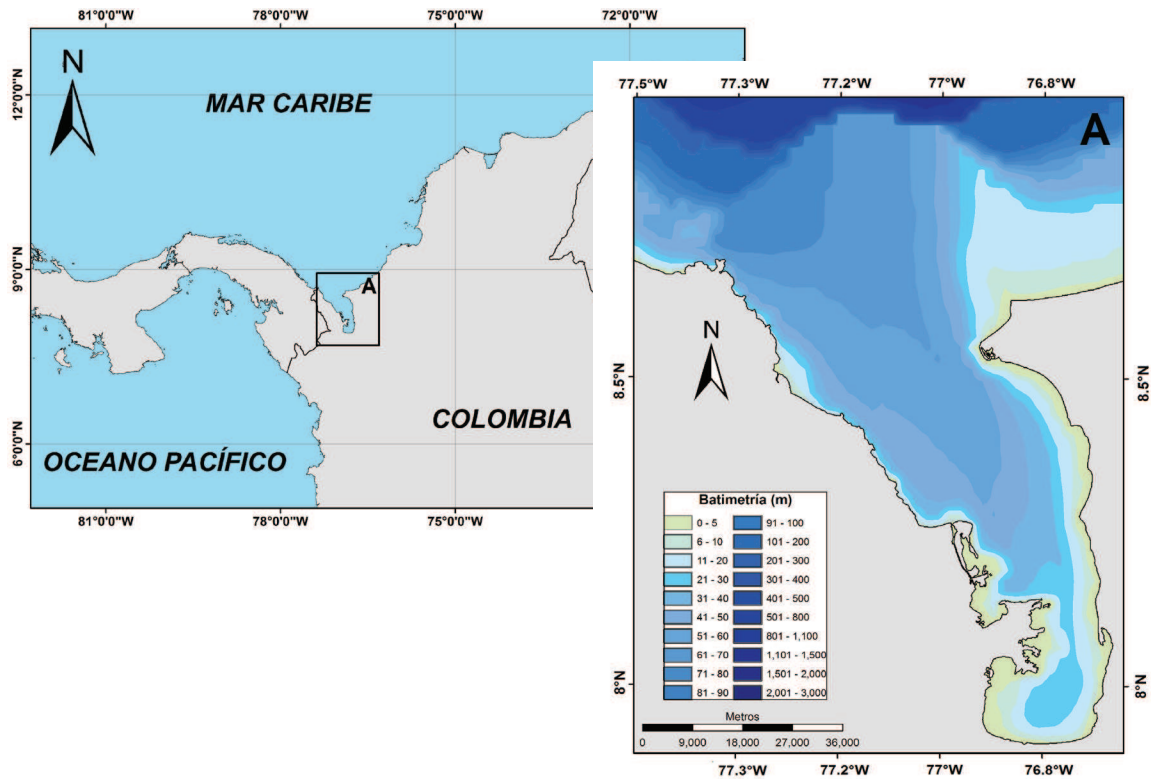


Figura 1. Área de estudio correspondiente al Golfo de Urabá y sus rangos de profundidades.

METODOLOGÍA

A partir de los datos de oleaje pertenecientes a la malla regional del Atlántico Norte disponibles en WAVEWATCH III, se obtuvo una serie sintética de oleaje (Hs, Tp y Dp) con extensión temporal de ocho datos diarios (datos cada tres horas), con resolución espacial de $0,16^\circ$ y con una cantidad total de 35268 datos correspondientes al periodo comprendido entre 1999/07/09 y 2011/09/09. Es importante señalar que el modelo numérico WaveWatch III (WWIII) es un modelo de oleaje de tercera generación, en el que se parametriza de manera explícita el crecimiento y decaimiento del oleaje, incluyendo el cálculo de las interacciones no lineales del oleaje individual.

Este modelo fue validado a escala global con datos provenientes de boyas de oleaje y con datos de altimetría satelital (ERS-1) con óptimos resultados [16, 17], obteniendo errores cuadráticos del 15 % con respecto a la altura media del oleaje registrada por boyas escalares y altimetría satelital.

Estos datos de oleaje extraídos al norte del Golfo de Urabá, utilizados para determinar la climatología en la presente investigación, se validaron mediante la comparación de datos de Hs pertenecientes a una de las boyas de la Dirección General Marítima (Dimar), localizadas en la misma zona (figura 2). Estas boyas cuentan con datos de Hs, Tp, Dp, entre otros.

Para la validación de los datos se compararon las series de altura significativa del instrumento de medición y las series de altura significativa extraídas del modelo de enero a octubre del 2011, siguiendo una parte de la metodología desarrollada por los investigadores del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados [18]. Es importante tener en cuenta que la profundidad a la que se encuentra la boya de oleaje y la profundidad a la que fue tomado el punto de WWIII pueden influir en las comparaciones de las alturas del oleaje. Aunque las dos se encuentren en aguas profundas, la boya de oleaje está ubicada a profundidades un poco menores.

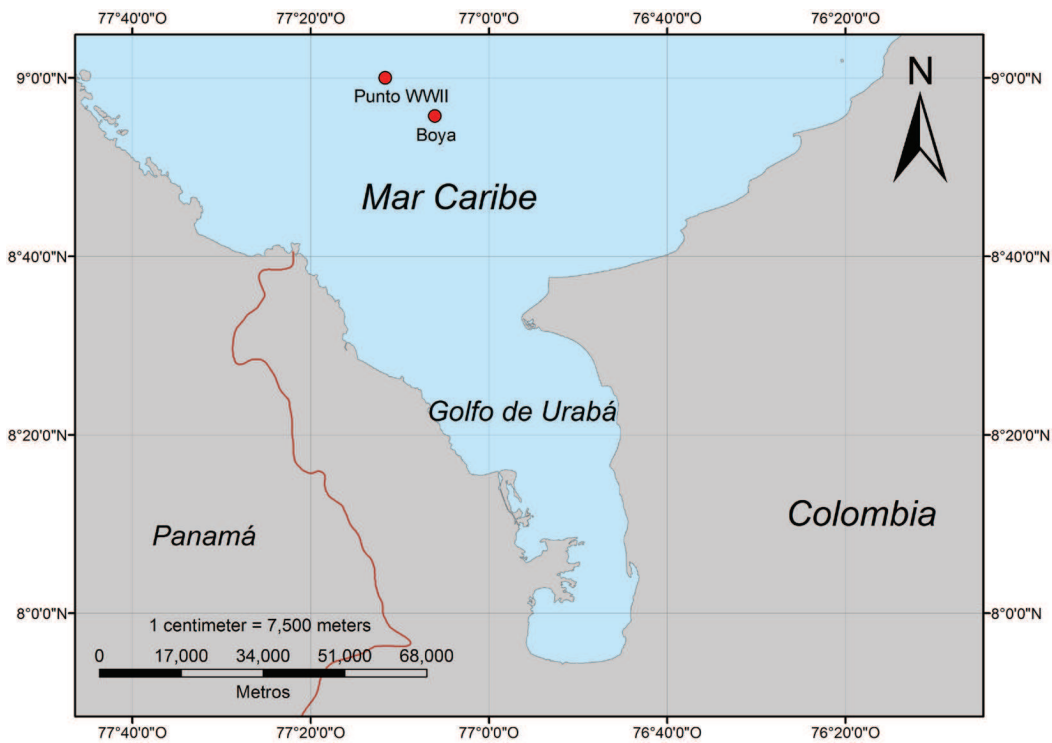


Figura 2. Localización general del sitio en donde se obtuvo información de oleaje - datos WWIII. Punto WWIII ($9^\circ 0'N$, $77^\circ 16'W$), y localización de la boya de oleaje Dimar ($8^\circ 9'24'N$, $77^\circ 06'W$).

RESULTADOS

Validación de los datos de oleaje en el dominio temporal

Para determinar la precisión de los datos del modelo WaveWatch III con respecto a los datos medidos *in situ*, se hace una comparación punto a punto de las dos series. Esta comparación se lleva a cabo seleccionando fechas coincidentes de las series temporales.

En la figura 3 se observa la comparación de las alturas de oleaje cada tres horas correspondientes a los datos de WWIII y la boya de oleaje de la Dimar. La serie abarca datos coincidentes desde enero a octubre de 2011, descartando algunos espacios de tiempo en las dos series donde faltan datos de Hs por fallas en la boya. Aunque los puntos no coinciden exactamente en ubicación geográfica, se observa que los datos de Hs medidos por la boya son bien reproducidos por el modelo.

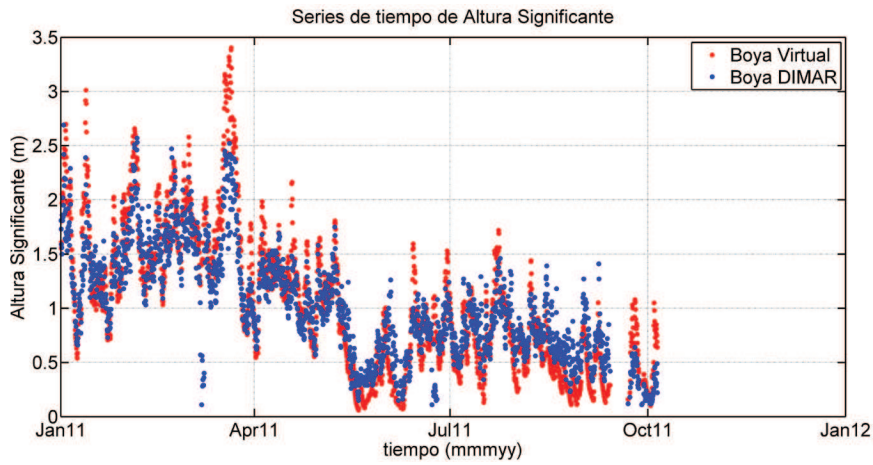


Figura 3. Serie de tiempo evaluada de altura significativa de la ola para las series cada tres horas. En rojo los datos del modelo y en azul los datos de la boya de la Dimar.

En la Figura 4 se muestra el diagrama de dispersión de los datos del modelo frente a los datos de la boya de la Dimar. En ella se ob-

serva una alta correlación lineal entre los datos del modelo y los datos de la boya y se corrobora con un valor de correlación de 0,8991.

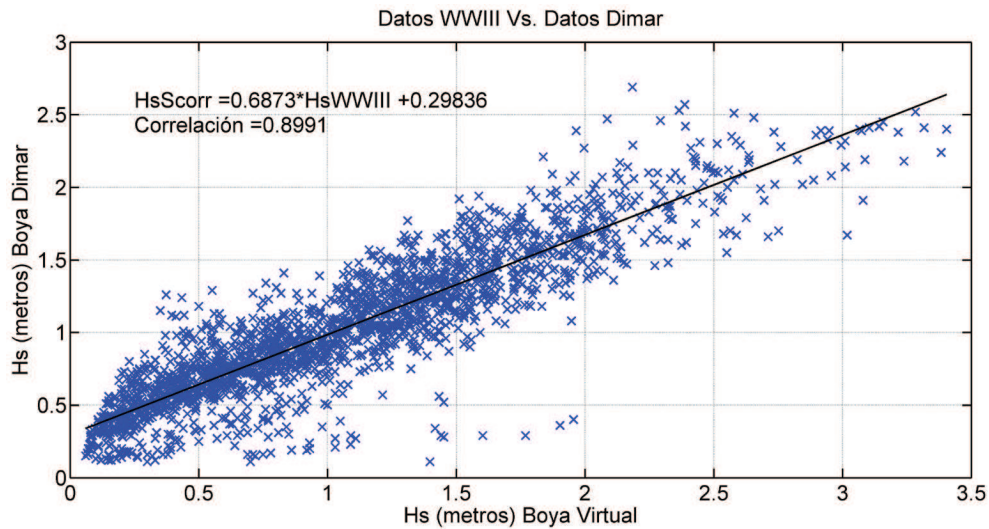


Figura 4. Diagrama de dispersión donde se correlacionan los datos WWIII con los datos de la boya de la Dimar. Estos datos se encuentran espaciados cada tres horas para cada una de las series y coinciden en las fechas de enero a octubre de 2011.

Como se observa en las gráficas anteriores y en los resultados de la correlación, los datos de oleaje sintéticos pertenecientes al modelo WaveWatch III representan muy bien los datos registrados *in situ* por la boya de oleaje, por lo tanto es posible afirmar que los datos de oleaje pertenecientes al modelo WaveWatch III fuera del Golfo de Urabá son confiables para el uso en la determinación de la climatología que se lleva a cabo en la presente investigación.

Posteriormente, con el fin de visualizar la concordancia de los grupos de datos en

las direcciones predominantes para la región de estudio, en la figura 5 se separan los valores de altura de oleaje por cuadrantes así: A) de 0° a 90° en color azul y de 270° a 360° en color verde B) En esta gráfica se observa que los datos que mejor representa el modelo son aquellos que provienen de direcciones entre 0° y 90° y en un menor grado, los datos de altura de ola provenientes de las direcciones entre 270° y 360°. Los demás cuadrantes no se tienen en cuenta para representarse en diagramas de dispersión, puesto que son muy pocos los datos de altura de ola asociados a estas direcciones y no son suficientes para este tipo de representación.

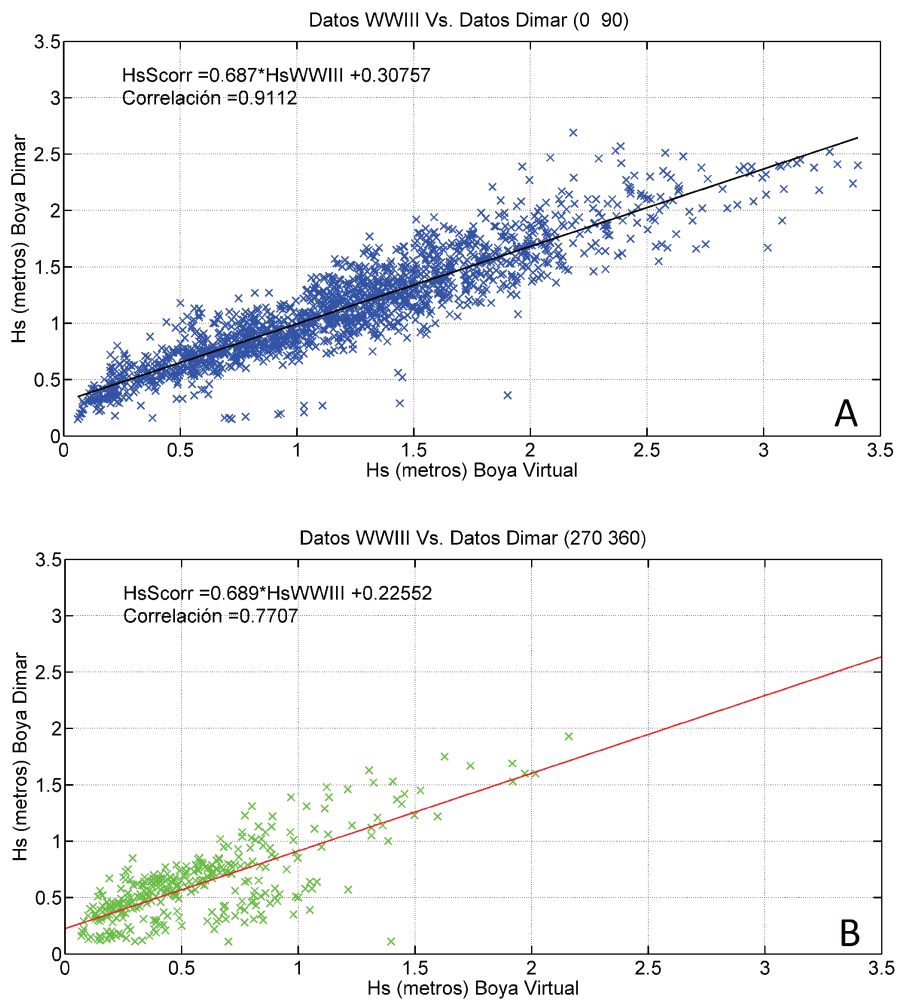


Figura 5. Diagrama de dispersión de los datos WWIII frente a los datos de la boya de la Dimar para las direcciones entre 0° y 90°, con un total de datos de 1601 **(A)** y 270° y 360° con un total de 318 datos **(B)**.

Validación de los datos de oleaje en el dominio de la probabilidad

Como complemento a la validación de los datos WWIII, las dos series de datos fueron ajustadas a una función de distribución

LogNormal para su comparación, determinando la probabilidad de no excedencia entre 50 y 99,5 % para las diferentes alturas significativas. La Figura 6 muestra los ajustes a esta función para los datos de la boya de la Dimar y los datos del modelo WWIII, respectivamente.

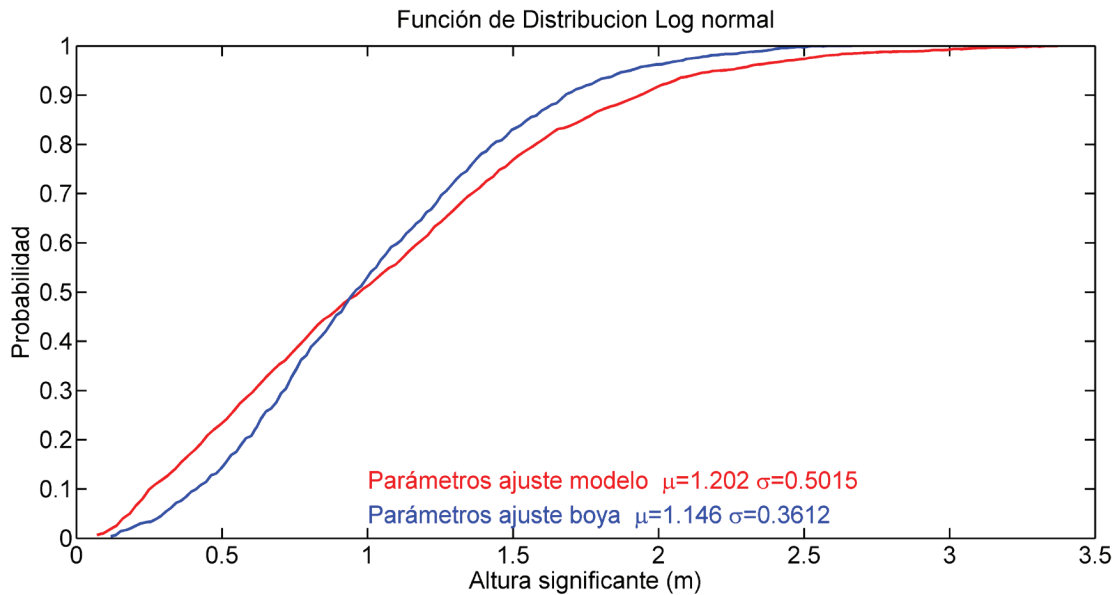


Figura 6. Funciones de distribución LogNormal para los datos de la boya de la Dimar (color azul) y para los datos de WWIII (color rojo).

Aunque las curvas son ligeramente diferentes, se aprecia que el parámetro de ajuste (μ) o media de la distribución LogNormal en ambas distribuciones está alrededor de 1,2 m y el parámetro de desviación típica de la distribución (σ) es mayor para los datos WWIII, indicando que estos últimos se encuentran más dispersos de la media. Los datos de altura significativa, representados en la gráfica, indican que a partir del percentil del 50 % las alturas de oleaje arrojadas por el modelo empiezan a sobreestimar levemente los datos medidos por la boya de oleaje. La boya de oleaje registra como altura máxima 2,5 m en el periodo evaluado, mientras que el

punto WWIII registra una altura de 3,4 m, lo cual indica que los valores extremos entre las series comparadas tienen una diferencia más marcada.

Por último, se realizó una gráfica cuantil-cuantil para determinar si las dos funciones de distribución presentan el mismo comportamiento al ser ajustadas a distintos grupos de datos. En la Figura 7 se representa en uno de los ejes la probabilidad de no excedencia asociada a una altura de ola significativa obtenida en la boya de la Dimar, y en el otro eje la probabilidad de no excedencia asociada a una altura de ola significativa obtenido en el punto modelado con WWIII.

La proximidad de los puntos a la bisectriz marcada en rojo indica que los datos de oleaje WWIII representan muy bien los registros de la boya de oleaje, aun cuando se observa que tanto por debajo como por arriba de la media estimada en el ajuste a una Log-Normal hecho anteriormente (1,2 m aproximadamente), el modelo está subestimando y sobrestimando respectivamente los datos de oleaje registrados por la boya. Esta misma condición se observa en la comparación de los datos punto a punto en la figura 3, donde la Hs de la señal extraída del modelo WWIII sobrestima los datos reales tomados por la boya, lo cual tiende a ser una complicación a la hora de determinar el régimen extremal de la Hs.

Climatología

Como se mencionó en la descripción del área de estudio, en el periodo seco la magnitud del viento es mayor que en el periodo lluvioso y esto se ve reflejado en las alturas de ola extraídas para los once años de datos del modelo WWIII en el mismo punto de la calibración. En la figura 8 se observa la evolución mensual multianual de los parámetros de altura de ola, periodo pico y dirección pico.

Entre mayo y noviembre se presentan las menores alturas de ola, siendo septiembre y octubre los meses que presentan alturas de ola promedio más bajas (0,55 y 0,54 m, respectivamente). Los meses de mayores alturas de ola corresponden a enero, febrero y marzo, con alturas de ola superiores a los 2 m de altura. Las alturas de ola guardan una estrecha relación con las épocas climáticas del año en

el Golfo de Urabá. Los periodos picos mensuales multianuales oscilan entre 6,2 y 7,8 s, para este parámetro también se aprecia una correlación con las épocas climáticas del año presentes en el Golfo de Urabá.

Regímenes medios

Para el estudio del régimen medio se representaron las funciones de distribución de altura de ola significativa y periodo de pico, tomadas del punto validado de WWIII. Esta función de distribución es una función tal, que asigna la probabilidad de que la variable aleatoria, en este caso Hs y Tp, tome valores menores o iguales a uno dado.

En la función de distribución de altura de ola significativa (Hs) (Figura 9) se observa que el cuartil del 50 % es igual a 1,13 m, es decir, hay un 50 % de olas que superan este valor y otro 50 % que no lo superan. La altura de ola que es superada por el 25 % de las olas se corresponde con el cuartil del 75 %, siendo esta altura de 1,70 m. Una gran parte de las alturas de ola superan el cuartil del 25 % que es el más pequeño de todos, ya que es superado por un 75 % de las alturas; su valor es de 0,7075 m. A partir de la altura de ola (Hs) máxima que para esta serie tiene un valor de 3,50 m y de la altura de ola (Hs) mínima que es de 0,01 m, la función de distribución de Hs se hace estable. En cuanto al periodo pico (Figura 9) se observan los cuartiles calculados, un 75 % tiene periodos mayores de 6,408 segundos, que corresponde al cuartil del 25 %, el cuartil del 50 % corresponde a un periodo de 7,34 segundos y el cuartil de 75 % es el periodo de 8,11 segundos (Figura 7).

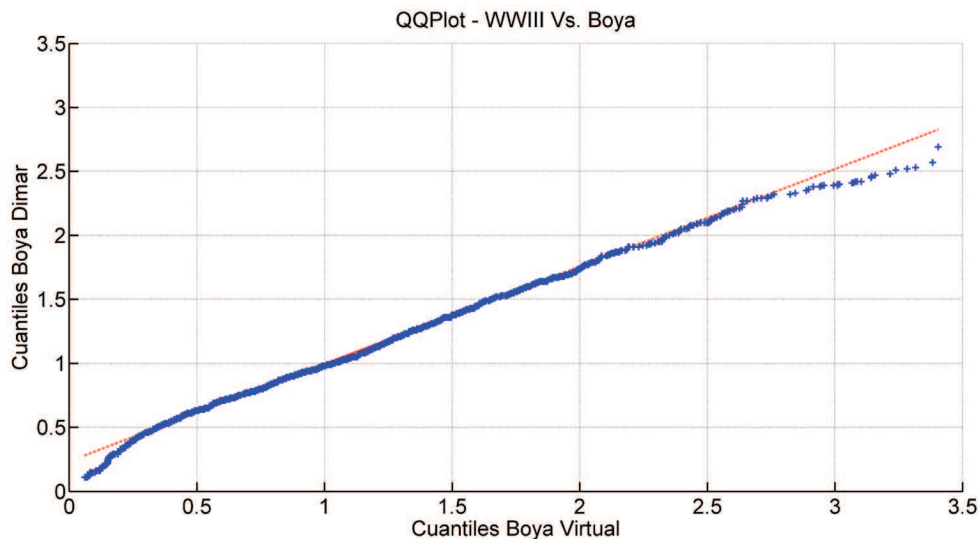


Figura 7. Gráfica cuantil-cuantil para los datos de la boya de la Dimar y los datos WWIII.

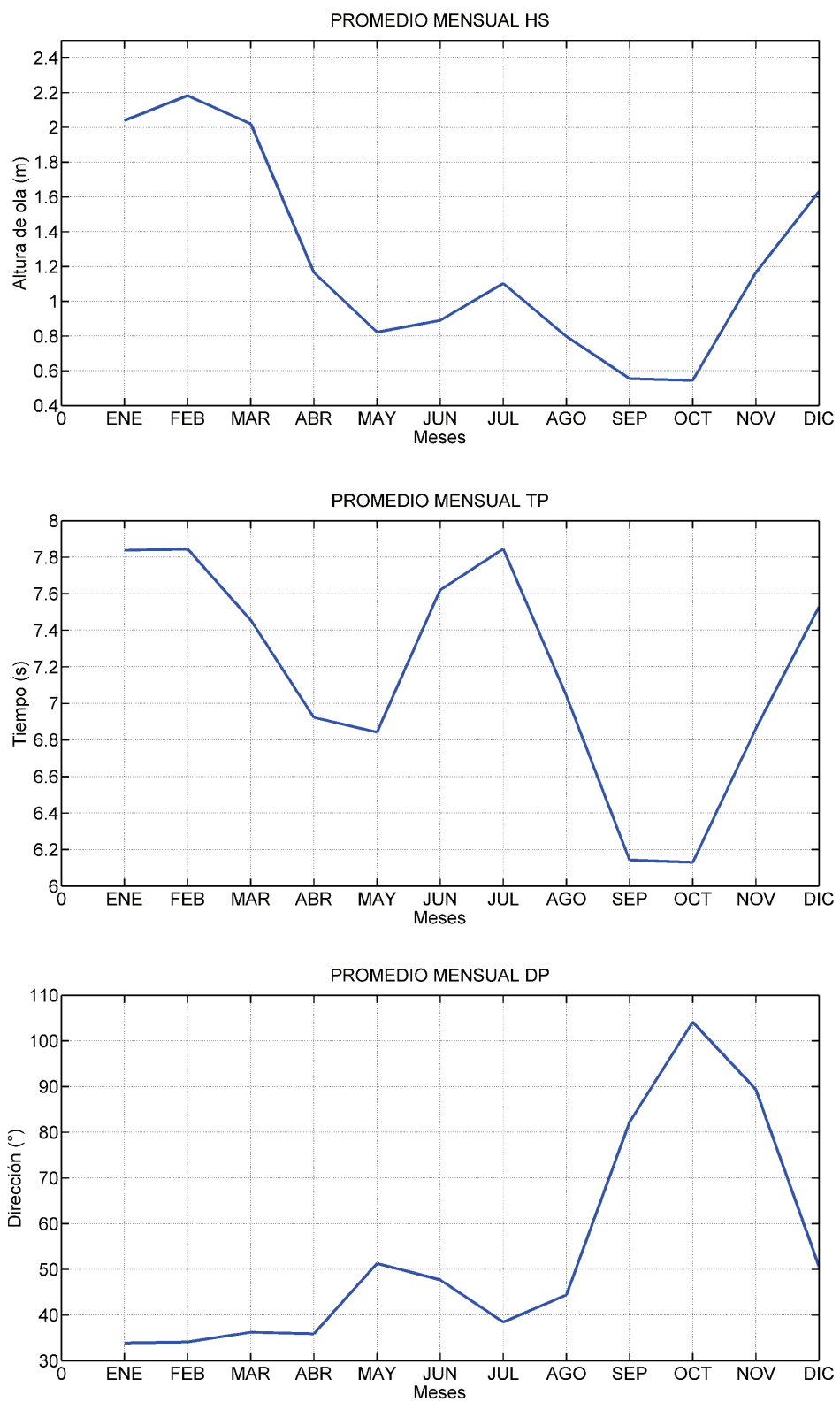


Figura 8. Medias mensuales multianuales para once años de datos de Hs, Tp y Dp, pertenecientes al de punto de oleaje extraído de los datos WaveWacht III.

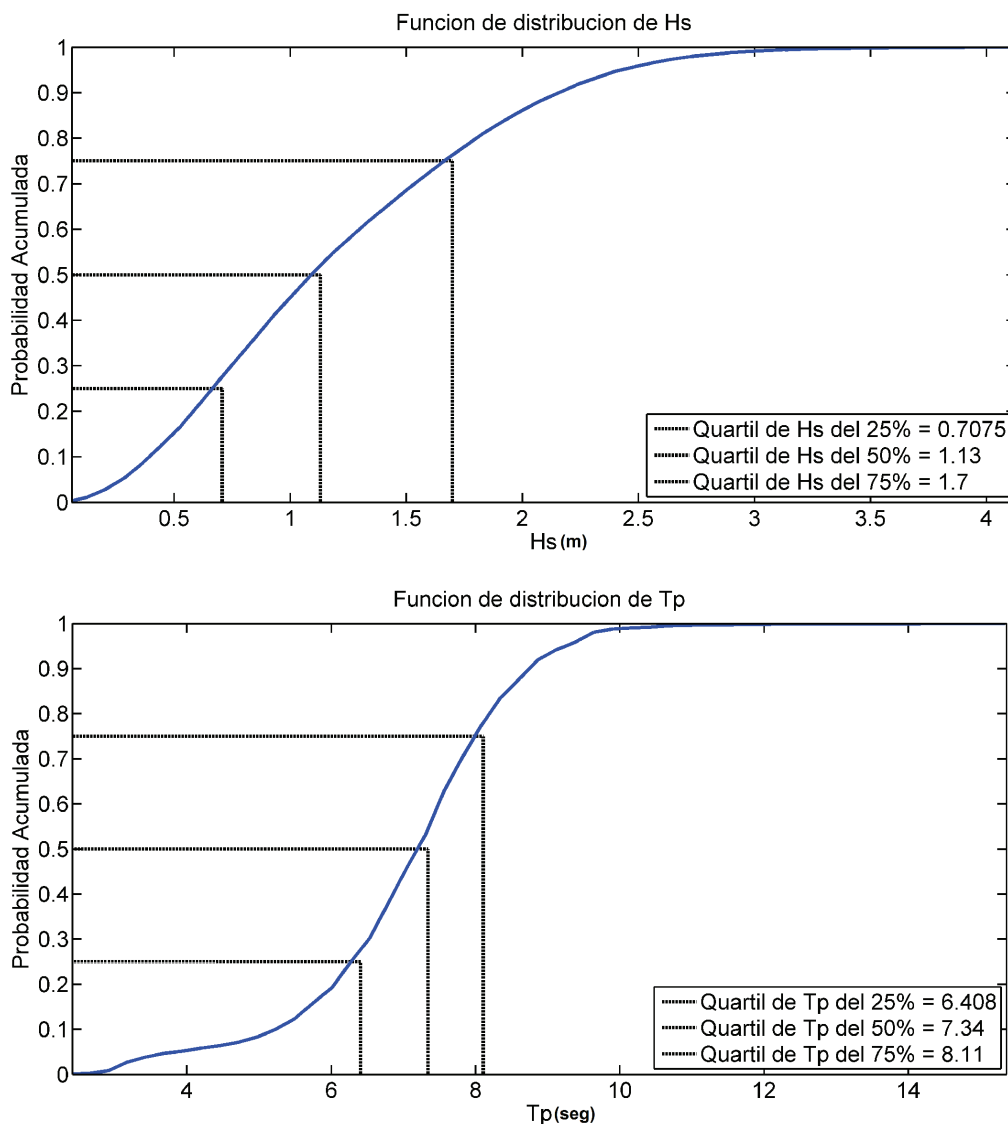


Figura 9. Funciones de distribución de Hs y Tp del punto de oleaje.

El clima de olas al norte del Golfo de Urabá en profundidades indefinidas se encuentra dominado por una fuerte presencia de trenes de oleaje provenientes de las zonas de generación localizadas al noreste (48,95 %) y norte-noreste (40,98 %), como se mencionó anteriormente, y que suman un total del 89,93 % de las ocurrencias.

En la rosa de oleaje realizada para la serie y que se presenta en la Figura 10 se puede evidenciar lo afirmado; además, son visibles en la misma rosa algunos oleajes provenientes del norte y los oleajes locales en dirección sur-suroeste. En aguas profundas, la altura de ola promedio para el oleaje proveniente del noreste es de 0,90 m, para el oleaje proveniente del norte-noreste es de 1,65 m, estas olas pueden alcanzar alturas de 3,76 m en el año (Tabla I).

Los datos de Hs y Tp de las series de oleaje fueron ajustados a diferentes funciones de distribución (Weibull de mínimos, Normal, Log-normal, Gumbel de máximos) con el fin de construir los regímenes de altura y periodo del oleaje. Se encontró que la serie de datos de altura significativa se ajustaban mejor a la función de distribución Weibull de mínimos (figura 11A), al igual que la serie de periodo pico (figura 11B).

Para la serie de datos de oleaje se calculó un régimen de altura significativa que varía entre 0,3 y 3,5 m, encontrando niveles de 1,13 y 2,5 m que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 95 %, respectivamente (Figura 11A). Por su parte, el régimen de periodo pico para la serie de oleaje presenta valores entre 5,5 y 11,50 s, con periodos de 7,6 y 10,2 s que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 99 %, respectivamente (figura 11B).

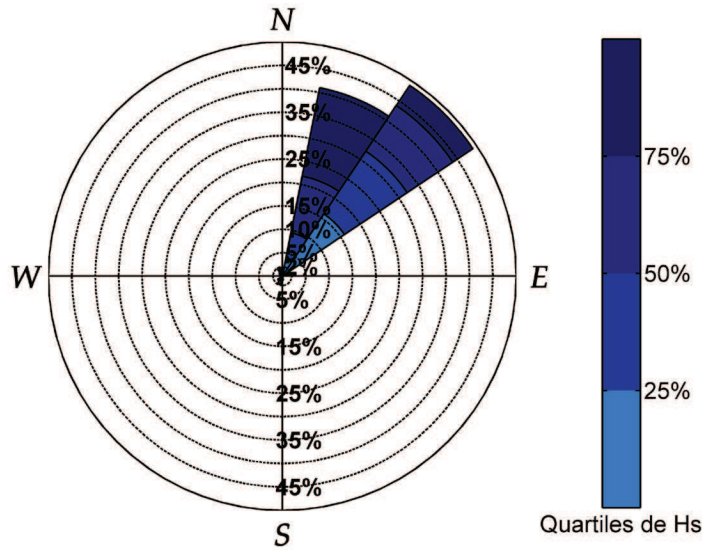


Figura 10. Rosa de oleaje considerando información combinada de dirección predominante y altura significativa.

Tabla I. Resumen estadístico de la serie de oleaje (Hs) correspondiente al punto de re-análisis del modelo WWIII. Hs12 es la altura de ola significativa en aguas profundas excedida 12 veces al año en régimen medio.

Direcciones (°)	Prob.Dirección	Hs (50 %)	Hs (90 %)	Hs (99 %)	Hs12
N	0,0156	0,8913	1,9550	3,070	3,3467
NNE	0,4098	1,6500	2,5015	3,2696	3,7617
NE	0,4895	0,9200	1,7250	2,4270	2,9152
ENE	0,0012	0,3600	0,6680	0,8900	0,8900
E	0,0022	0,5625	1,2208	2,8087	3,0075
ESE	0,0018	0,4400	0,7800	1,2316	1,2350
SE	0,0010	0,4075	0,6757	0,8250	0,8250
SSE	0,0029	0,5600	1,0300	1,2847	1,2900
S	0,0088	0,6400	0,9800	1,4861	2,6275
SSW	0,0180	0,6800	0,9600	1,2085	1,3800
SW	0,0121	0,6700	0,9600	1,2348	1,3358
WSW	0,0037	0,5925	1,0300	1,4408	1,8200
W	0,0027	0,6800	1,0900	3,0071	3,0600
WNW	0,0025	0,2900	0,8760	1,1815	1,2400
NW	0,0086	0,5687	1,2605	2,2346	2,5425
NNW	0,0195	0,7300	1,9645	2,7880	3,0717

Regímenes extremales

Para calcular el régimen extremal existen una serie de funciones de distribución de probabilidad que permiten calcular periodos de retorno y probabilidades de no excedencia de una altura significativa determinada a partir de un conjunto de valores extremales, refiriéndose al conjunto de máximos relativos que superen un cierto valor característico y que formen una muestra de valores independientes en el tiempo.

Para determinar el régimen extremal del oleaje de la serie de once años extraída en el extremo norte del Golfo de Urabá se utilizó el método del máximo anual, el cual divide la serie temporal en unidades de un año seleccionando los valores máximos de esa variable en el tiempo, logrando obtener una serie continua de valores

extremos independientes a lo largo del tiempo.

Habiendo determinado estos valores extremos, se procedió a ajustarlos a la función de distribución de Gumbel para determinar los periodos de retorno de las alturas de oleaje en la zona de estudio.

Para el régimen extremal del oleaje en el extremo norte del Golfo de Urabá se presentan los resultados en papel probabilístico Gumbel de máximos, donde se muestra el nivel de altura de oleaje en metros y el periodo de retorno en años para la zona de estudio (figura 12). La figura indica que para un periodo de retorno de 25 años la altura de ola significativa en el punto extraído al norte del Golfo registrará 4,5 m, para un periodo de retorno de 100 años la altura de oleaje en el mismo punto alcanzará los 4,9 m.

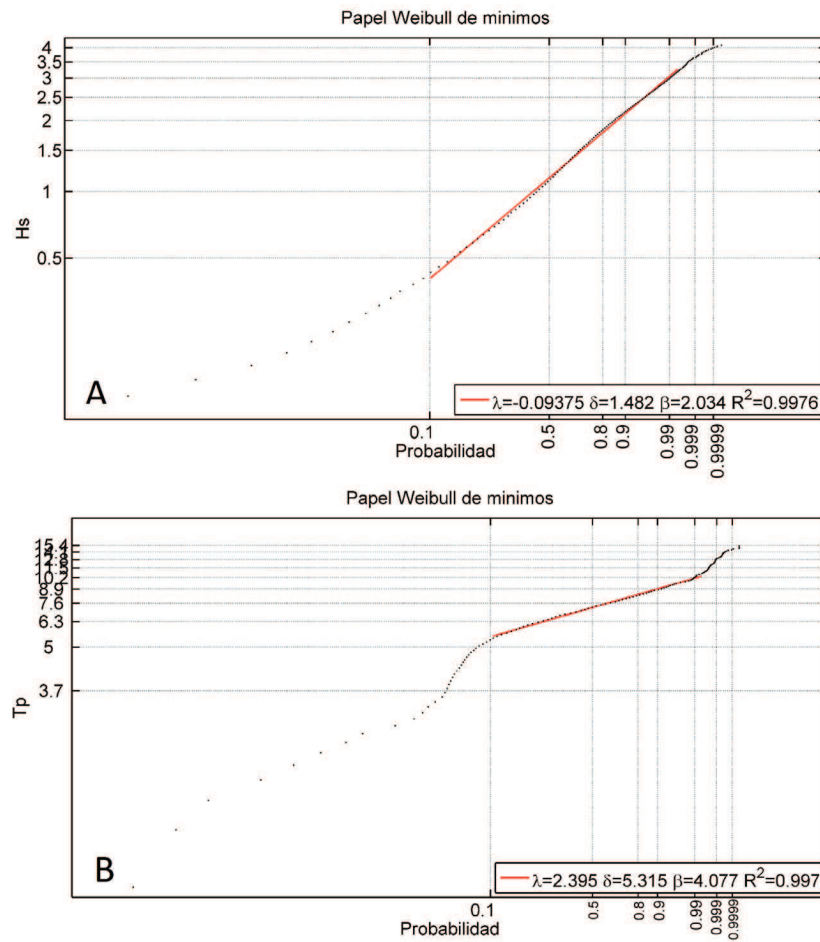


Figura 11. Ajuste a funciones de distribución de la serie de oleaje en aguas profundas. **(A)** Régimen de altura significativa–Distribución Weibull de mínimos; **(B)** Régimen de periodo pico– Distribución Weibull de mínimos.

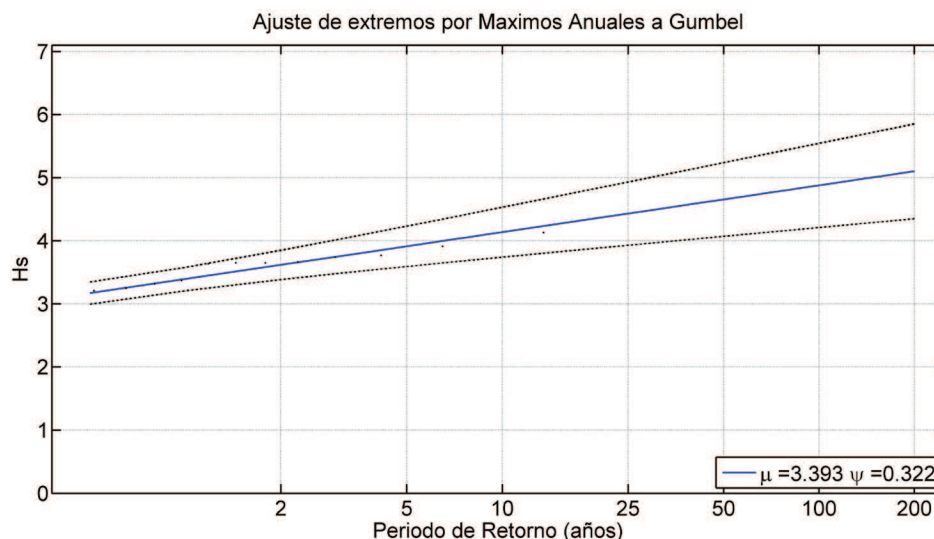


Figura 12. Ajuste de la series de oleaje extremal a la función de distribución de Gumbel de máximos.

CONCLUSIONES

La validación de los datos de oleaje del modelo WaveWatch III por medio de la comparación con datos de oleaje *in situ* registrados por la boya de la Dimar en el extremo norte del Golfo de Urabá, determina la fiabilidad de los datos de oleaje disponibles en el programa de re-análisis WaveWatch III y le da importancia a la utilización de estas series de oleaje, en la determinación de parámetros de entrada para otros modelos morfodinámicos en estudios donde no se cuenta con datos de oleaje instrumentales con grandes extensiones de tiempo.

Al comparar las series de datos de oleaje en el dominio de la probabilidad para el proceso de calibración, se observa que los datos de oleaje WWIII subestiman y sobrestiman levemente los datos registrados por la boya, esto puede presentarse por la discretización del dominio del modelo, por las condiciones de frontera impuestas en la modelación de la malla del Atlántico Norte de la que se extrajeron los datos sintéticos para la presente investigación o por la ubicación de los puntos de oleaje localizados a diferentes profundidades.

El comportamiento observado en el análisis del ciclo anual del oleaje sintético en

el extremo norte del Golfo de Urabá determina que existe una estrecha relación entre las épocas climáticas del año presentes en esta zona del Caribe (época seca: vientos fuertes) (época húmeda: vientos débiles) y las alturas significativas del oleaje. Durante la época seca se observan alturas de ola superiores a los 2 m, principalmente entre enero y marzo, durante la época húmeda las alturas de ola se encuentra alrededor de los 0,50 m. Resultados similares a los del estudio llevado a cabo por [2], quien determinó que el comportamiento anual del oleaje en el Caribe era bimodal asociado con los vientos Alisios del Noreste.

El clima de olas en profundidades indefinidas al norte del Golfo de Urabá, según la estadística, se encuentra dominado por una fuerte presencia de trenes de oleaje provenientes de las zonas de generación localizadas al Noreste (48,95 %) y Norte-Noreste (40,98 %). Resultados que coinciden con los de [6], quienes determinaron que el oleaje proveniente de la dirección NE tiene mayor energía, después de utilizar su modelo matemático *Hindcast Shallow Water Waves* en el Caribe colombiano. Por otra parte, en el área de estudio también se determinó que en septiembre y noviembre existen trenes de onda provenientes de las direcciones Norte, Suroeste y Sur-Suroeste.

Para la determinación del comportamiento medio del oleaje en aguas profundas se encontró que los datos de altura significativa se ajustaban mejor a la función de distribución Weibull de mínimos, al igual que la serie de periodo pico. Los datos indican que la altura significativa de oleaje varía en un rango entre 0,3 y 3,5 m., encontrando valores de oleaje de 1,13 y 2,5 m correspondientes a probabilidades de no excedencia de 50 y 95 %, respectivamente. Por su parte, el régimen medio de periodo pico para la serie de oleaje presenta un rango de valores entre 5,5 y 11,50 s, con periodos de 7,6 y 10,2 s que corresponden a probabilidades de no excedencia de 50 y 99 %, respectivamente.

También fueron definidos los regímenes extremales de oleaje para la zona de estudio mediante el ajuste de los datos de oleaje a una función de distribución de Gumbel de máximos, con esta función se obtienen valores de altura de ola para periodos de retorno superiores a los once años que se obtuvieron de la serie sintética. Se determinaron valores de altura de oleaje de 4,5 m para periodos de retorno de 25 años y valores 4,9 m para periodos de retorno de 100 años.

Estas condiciones de oleaje medio y extremal determinadas en el extremo norte del Golfo de Urabá son de gran utilidad para determinar condiciones de frontera y forzadores de modelos dentro de un análisis de variación morfológica y transporte de sedimentos o para determinar parámetros técnicos de construcción y diseño de estructuras offshore.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias y a la Universidad EAFIT, por el apoyo económico brindado a través del proyecto "Erosión Costera en Antioquia II: modelación de la evolución morfológica en el golfo de Urabá", desarrollado en conjunto con el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Este trabajo hace parte del estudio "Metodología para la determinación de la cota de inundación debida a eventos extremos en playas naturales", el cual fue presentado como trabajo de grado para obtener el título de Master en Oceanografía Física del autor principal.

Al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe por el gran apoyo brindado durante la presente investigación, a

sus técnicos y profesionales y a todo el personal que de una u otra manera, hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Wright, L.D., Coleman, J.M. 1973. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull.* 57(2), pp. 370-398.
- [2] Osorio, A. y Montoya, R. 2009. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el Mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH No. 27*: 37-56 pp.
- [3] Tejada, C.E. 2002a. Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Bol. Cient. CCCP No. 9*.
- [4] Tejada, C.E. 2002b. Clima marítimo de la Bahía de Tumaco: un caso de aplicación del sistema de modelado integral de zonas costeras para Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias Tecnológicas para la Gestión de la Costa. Universidad de Cantabria. España, 44 pp.
- [5] Horrillo, J., Maza M. y Rejtman, P. 2000. Análisis de oleaje para la zona del Caribe colombiano con información escasa. Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental, Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia.
- [6] Giraldo L. y Lonin, Serguei. 1997. Cálculo del oleaje y el transporte de sedimentos en la costa Caribe colombiana. *Bol. Cient. CIOH, ISSN 01200542, No. 18*: 39-49.
- [7] Lonin, S., Tuchkovenko, Y. y Lonina I. 1996. Utilización del modelo Nedwam para el cálculo y pronóstico del oleaje en el Mar Caribe. *Bol. Cient. CIOH No. 17*: 37-45.
- [8] Agudelo, P. 2003. Cota de inundación del litoral Pacífico colombiano. Tesis de máster Universidad de Cantabria. 85 pp.
- [9] Tolman, H.L. 2002a. Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. *National Oceanic and Atmospheric Administration*.

Administration, Environmental Modeling Center – Ocean Modeling Branch. Technical Note. 33 pp.

- [10] Tolman, H.L. 2002b. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Computing*. 28, 35-52 pp.
- [11] Agudelo, P., Restrepo, A., Molaes, R., Tejada, C., Torres, R. y Osorio A. 2005. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH No. 23*: 33-45 pp. ISSN 01200542.
- [12] Restrepo, J. 2009. Clima de oleaje en el Pacífico sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros.
- [13] Montoya, L., Toro, F. y Gómez, E. 2008. Modelación hidrodinámica de la pluma del río Atrato en el Golfo de Urabá, Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- [14] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). 2010. Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano. Turbo-Golfo de Urabá.
- [15] Invemar. 2003. Diagnóstico, zonificación y definición de la estructura administrativa y manejo de la unidad costera del Darién, Caribe colombiano. Fase I. Caracterización y diagnóstico. Informe técnico. 698 pp.
- [16] Tolman, H.L. 1992. Effects on numerics on a physics of a third generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* 22, 1095-1111.
- [17] Tolman, H., Chalikov D. 1994. Source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.* 26, 2497-2518.
- [18] Méndez, F., Orfila A. y Cañellas, B. 2007. Análisis y caracterización del clima marítimo en las Islas Baleares. Informe Final. Universidad de las Islas Baleares, Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Islas Baleares. 8-11 pp.

