



Artículo

DETERMINACIÓN DEL CLIMA DE OLAJE MEDIO Y EXTREMAL EN EL CARIBE COLOMBIANO

Pablo AGUDELO RESTREPO¹, Andrés F. RESTREPO ESTRADA¹, Ricardo MOLARES², Carlos E. TEJADA VÉLEZ³, Ricardo TORRES², Andrés F. OSORIO ARIAS⁴.

¹ *Aqua & Terra Consultores Asociados S.A., Cra 63B No 34 – 22, Medellín, E-mail: pablo.agudelo@aquayterra.com.*

² *Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH, Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, AA. 982, D. T. y C., Colombia, E-mail: jsemon@cioh.org.co.*

³ *Dirección General Marítima, El CAN, Bogotá, E-mail: ctejada@dimar.mil.co.*

⁴ *Universidad Nacional Sede Medellín, Calle 59A No 63 – 20, Medellín, E-mail: androso@gmail.com.*

Resumen - El presente artículo presenta, en primera instancia, las ecuaciones de corrección de los datos de oleaje visual proporcionados por los barcos en ruta obtenidas de la comparación con datos instrumentales de una boya escalar de oleaje. En segunda instancia, presenta una metodología de generación de oleaje por el paso de tormentas tropicales y huracanes en el Caribe colombiano, haciendo uso de datos de velocidad del viento máxima de la tormenta estimados por satélites. Por último, se presentan los regímenes de oleaje, medio y de temporal, en aguas profundas de la misma zona.

Abstract - The present article presents the equations for the wave visual data correction. These equations were obtained by comparison between both, visual data and instrumental data from a scalar wave buoy. Later, it presents a methodology for the generation of waves using the information from tropical storms in the Caribbean Sea. For that, we used data of wind velocity measured by satellites. Finally, the regimes of waves were obtained.

Palabras clave – Oleaje, Caribe, huracanes, regímenes, Colombia.

Key words – Wave, Caribbean, hurricane, regimes, Colombia.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, Colombia no cuenta con un programa de medición de datos de oleaje. Esta carencia se hace cada vez más patente por cuanto los problemas costeros y las necesidades de nuevas instalaciones portuarias son cada vez

más apremiantes. En particular, el Caribe colombiano tiene una especial importancia en términos del turismo de playa y del comercio portuario del país. Un claro ejemplo son los problemas de erosión que existen entre el Delta del Sinú y Punta Caribana, un litoral de ~170 kms. de longitud (A&T S.A., 2005). Basta

también con mirar el crecimiento de los movimientos de carga/descarga de los puertos de Cartagena, Barranquilla y Santa Marta: 10% anual durante los últimos 4 años¹.

No obstante estas perspectivas, han habido pocos trabajos que han conducido a determinar con confiabilidad el clima marítimo del Caribe colombiano (figura 1). En el litoral Pacífico, por el contrario, sí se han hecho esfuerzos en ese sentido (Tejada, 2002; Agudelo, 2003). Ambos trabajos determinan los regímenes de oleaje, medio y extremal en aguas profundas con dos bases de datos diferentes, datos visuales de barcos en ruta y datos simulados numéricamente mediante el modelo WaveWatch III. Para obtener los regímenes medios de oleaje en el Caribe colombiano basta con encontrar ecuaciones de corrección para los datos proporcionados por los barcos en ruta de la zona de estudio, tal como lo han hecho otros autores para diferentes zonas del mundo (Hogben y Lumb, 1967; Jardine, 1977; Dirección General de Puertos de España, 1991). Para estimar los

regímenes extremales de oleaje en la misma zona, es necesario plantear una metodología que haga uso de la poca información con la que se cuenta y que parta de los modelos paramétricos existentes en la literatura científica (Goda, 1988; Cooper, 1998; Young, 1988; Young y Burchell, 1996; Banton, 2002) con el fin de plantear uno que sea lo suficientemente apropiado para las condiciones colombianas.

El objetivo de esta investigación es doble. En primer lugar, se busca corregir los datos de oleaje visual de barcos en ruta para determinar correctamente los regímenes medios de oleaje en el Caribe colombiano. En segundo lugar, se busca desarrollar una metodología para la generación sintética de oleajes producidos por el paso de tormentas tropicales sobre el Mar Caribe. En ese sentido, el artículo parte de una descripción detallada de los datos utilizados, plantea la metodología desarrollada y por último presenta los resultados de la investigación y las conclusiones a las que se llegó.

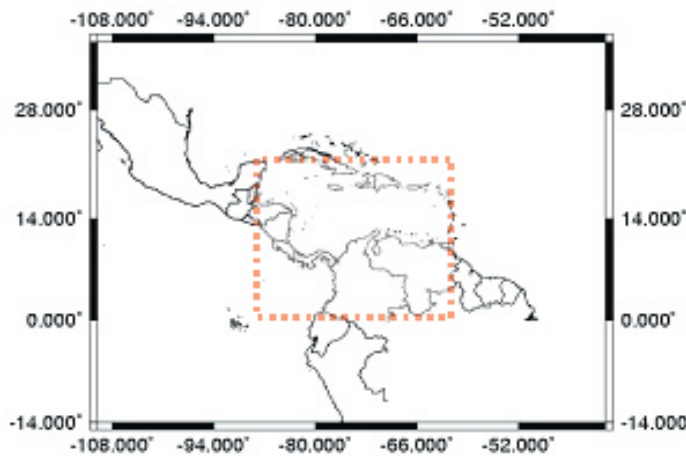


Figura 1. Zona de estudio.

DATOS

Las fuentes de información directa sobre oleaje disponibles en el área de estudio proceden de dos fuentes distintas: datos visuales aportados por barcos en ruta y datos registrados por boyas instrumentales en el Mar Caribe. Debido a la poca confiabilidad de estos datos para el análisis de oleaje extremal (por la incertidumbre de los

primeros y la poca longitud de las series de los segundos), producido por el paso de tormentas tropicales sobre el Mar Caribe, ha sido necesario también considerar fuentes indirectas para la generación sintética de dichos datos: registros de velocidad del viento y presión atmosférica en algunos puntos del Mar Caribe que serán utilizados para estimar, mediante modelos paramétricos de transformación, el oleaje de temporal. A

¹ Fuente: Dirección General Marítima, Ministerio de Defensa, República de Colombia, <http://www.dimar.mil.co/VBeContent/NewsDetail.asp?ID=3620&IDCompany=1>.

continuación se describen brevemente las bases de datos utilizadas.

OLEAJE VISUAL DE BARCOS EN RUTA

Los datos visuales de barcos en ruta que se han utilizado fueron facilitados por el British Meteorological Office y corresponden a la información que se tiene del Mar Caribe entre 1963- 1997. Pero para su utilización en ingeniería, es necesario corregir y calibrar éstos, ya que los datos visuales tienen una componente subjetiva asociada a la capacidad de discriminación y experiencia de los observadores. Diversas formulaciones permiten corregir estos datos y traducir las visualizaciones subjetivas a datos asimilables a medidas instrumentales objetivas (Hogben y Lumb, 1967; Jardine, 1977; Dirección General de Puertos de España, 1991); sin embargo, dadas las características particulares de la zona de estudio, se procedió a calibrar esta información con datos instrumentales, tal como se describe en el apartado siguiente. Con este procedimiento se logra traducir la altura de ola visual a altura de ola significativa y el período visual a período de pico del estado de mar.

DATOS INSTRUMENTALES

Se han utilizado los datos de la boya NOAA 41018, localizada en el sitio con coordenadas [15°N, 75°W] (figura 2). Este instrumento registró espectralmente durante tres años (1994-1996) tanto las condiciones meteorológicas como las de oleaje frente a la costa Caribe colombiana; la información se ha procesado y se han obtenido los parámetros altura de ola significativa y período de pico con resolución horaria.

VELOCIDAD DEL VIENTO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Se ha consultado en la base de datos National Hurricane Center de la NOAA la información correspondiente a cada una de las depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes que se han presentado en el Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México desde el año de 1921. Los reportes que esta oficina hace de cada evento contienen la historia sinóptica, las estadísticas meteorológicas y un análisis de la mejor trayectoria estimada de la tormenta. Los datos de la trayectoria, registrados cada 6 horas por imágenes de satélite, incluyen la posición geográfica, la presión atmosférica y la velocidad del viento en el ojo de la tormenta.



Figura 2. Localización de la boya NOAA 41018.

Los valores de velocidad del viento y presión atmosférica registrados por los satélites tienen asociado un error que depende de variables meteorológicas y astronómicas. Es por este motivo que se hace necesario corregirlos con datos medidos por instrumentos especializados, en este caso, boyas.

METODOLOGÍA

CALIBRACIÓN DEL OLEAJE MEDIO

La ausencia de medidas específicas de oleaje

en las inmediaciones de la zona de estudio obliga a la utilización de datos de oleaje visual. Esta base de datos tiene algunas carencias que deben ser corregidas mediante un proceso de calibración con datos instrumentales de una zona cercana. Se han utilizado, entonces, los datos registrados por la boya NOAA 41018 y los datos de oleaje visual de barcos en ruta tomados en un cuadrante de 110 km de lado alrededor del punto de localización de dicho instrumento. La calibración consiste en la determinación, para el régimen escalar, de un polinomio de ajuste entre el conjunto de cuantiles $\{[1:1:99] \cup [99:0.1:99.9] \cup$

[99.9:0.01:99.99]} de cada una de dichas series de datos, lo que garantiza una comparación directa entre parejas de datos con la misma probabilidad de no-excedencia.

Los parámetros de la calibración se supusieron invariables espacial y temporalmente para poder aplicarlos a los datos de oleaje visual cercanos a la zona de estudio. Esta hipótesis es lo suficientemente válida dado que los puntos se encuentran en profundidades indefinidas, donde la acción del fondo y los contornos costeros no modifican la propagación del oleaje. Los datos de altura de ola significativa, H_s , y de período de pico, T_p , se

ajustaron, ambos, a polinomios de orden 4. Los resultados se presentan, respectivamente, en la figura 3.

Nótese que los valores medios de altura de ola significativa (entre 1.0 y 3.0 m), son bien estimados por los observadores visuales, mientras que los máximos (mayores que 3.0 m), parecen estar sobrevalorados, con algunos casos en lo que se ha estimado hasta el doble de la altura de ola. En términos generales, los períodos visuales se ajustan bien para todo el rango de valores (4 a 18 s), aunque también muestran una ligera sobrevaloración que ya ha sido corregida con el polinomio de calibración.

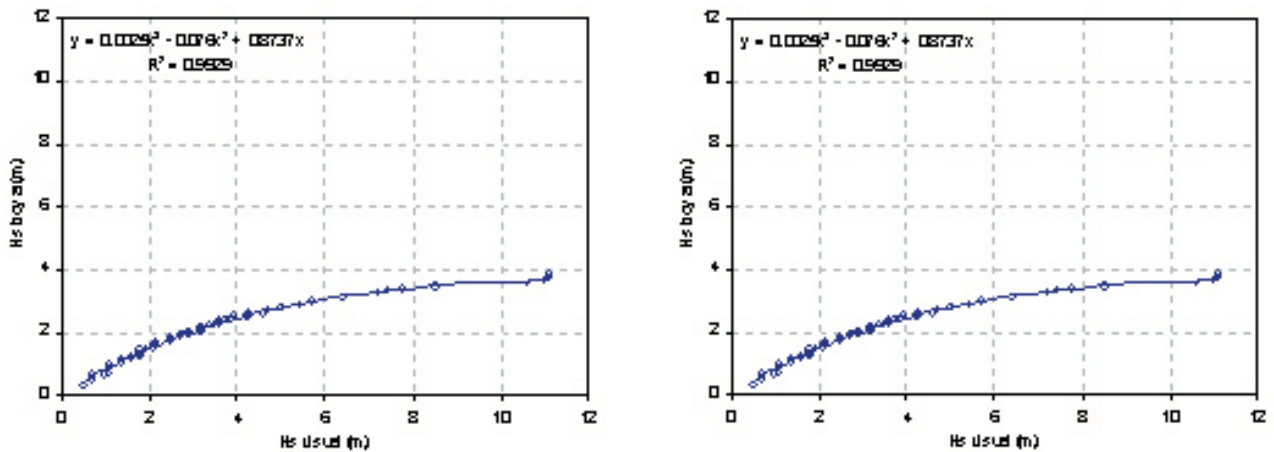


Figura 3. Ajustes de calibración de a) H_s visual y b) T_p visual.

GENERACIÓN DE OLAJE EXTREMAL

Generación de datos de altura de ola significativa, H_s : Por definición, los datos de oleaje visual pueden considerarse confiables, después del proceso de calibración, para la construcción de los regímenes medios de oleaje. Debido a que generalmente los barcos no zarpan o suelen cambiar de ruta cuando hay temporales, el oleaje extremal no queda bien caracterizado con esta fuente de datos, por lo que es necesario utilizar métodos indirectos para la generación sintética de dichos oleajes.

Si bien durante el trimestre diciembre-enero-febrero, DEF, el oleaje en la zona de estudio también puede considerarse de temporal, en términos generales, el oleaje extremal (entendido éste como el régimen construido a partir de la serie conformada por las máximas alturas de ola significativa de cada año) en el Mar Caribe es producido por el paso de tormentas tropicales y huracanes. Estos fenómenos atmosféricos se suelen caracterizar por dos variables: velocidad

del viento y presión atmosférica. Si se hace un tratamiento estadístico de estas variables es posible estimar, a partir de modelos paramétricos presentados en la literatura científica, la altura de ola significativa, H_s y el período de pico, T_p , producida por esas tormentas tropicales (Godá, 1988; Cooper, 1998; Young, 1988; Young y Burchell, 1996; Banton, 2002).

Partiendo del modelo paramétrico de USACE (1984) para una tormenta tropical moviéndose lentamente, las siguientes ecuaciones pueden ser usadas para obtener la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , en profundidades indefinidas:

$$H_s = 5.03 e^{\frac{R\Delta P}{4700}} \left[1 + \frac{0.29 \alpha V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right] \tag{1}$$

$$T_p = 8.6 e^{\frac{R\Delta P}{9400}} \left[1 + \frac{0.145 \alpha V_{fm}}{\sqrt{V_{max}}} \right] \tag{2}$$

donde $\Delta P = P_n - P_o$, diferencia de presión atmosférica entre el ojo y el límite exterior de la tormenta, V_{fm} la velocidad de movimiento de la tormenta, R el radio de viento máximo de la misma, V_{max} la máxima velocidad del viento para una tormenta en movimiento.

Como se aprecia en estas formulaciones, H_s y T_p están directamente relacionados con la velocidad del viento de la tormenta, V_{max} , y con la presión atmosférica, P_a . Sin embargo, estas dos variables también están relacionadas de manera inversa, tal como se muestra en la figura 4 para los datos del huracán Mitch, registrados a lo largo de su trayectoria entre el 22 de octubre y el 9 de noviembre de 1998. Por tanto, si existe una relación entre V_{max} y P_a , es estadísticamente posible encontrar una formulación de H_s y T_p que dependa de una de las dos variables únicamente. A esta conclusión llegaron, por separado, Ochi (1998), Hsu et al. (2000) y Kumar et al. (2003). El primero

encontró para las tormentas tropicales que llegaban a Estados Unidos una relación $H_s = 0.24 V_{max}$. Hsu et al. (2000) derivaron dos formulaciones a partir del modelo de Young (1988), una para cada variable de interés, que dependía de las características observadas en el Atlántico durante el huracán Georges de 1998. Los últimos encontraron, para ciclones de la India, que $H_s = 0.25 V_{max}$, muy parecida a la hallada por Ochi (1998), y $T_p = 4.5 H_s^{0.48}$ a partir de regresiones múltiples con datos de mayo de 1961 a noviembre de 1982.

Debido a que la información con la que se cuenta para este estudio se compone de V_{max} y P_a para cada tormenta, es posible, entonces, encontrar una relación similar a estas para las condiciones del Caribe colombiano, apoyándonos en los datos de agosto a diciembre de 1994 registrados por la boya NOAA 41018. Las trayectorias de las tormentas de 1994 se muestran en la figura 5.

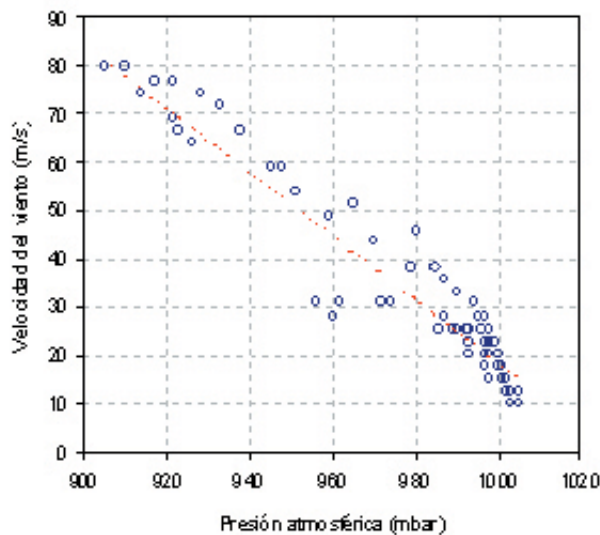


Figura 4. P_a vs. V_{max} para la trayectoria del huracán Mitch (22/10/98 – 09/11/98).

La figura 6 presenta las series de tiempo de H_s y V_{max} en el sitio de localización de dicho instrumento. Se han resaltado los períodos de tiempo de interés en este apartado. Obsérvese que entre el 12 y 14 de agosto se aprecia una H_s máxima de 3.4 m y V_{max} de 11.7 m/s, coincidentes con el paso de la tormenta tropical Beryl por el Golfo de



Figura 5. Trayectorias de las tormentas durante 1994. Fuente: NOAA.

México en su trayectoria hacia el sur de Estados Unidos. El huracán Chris, aún siguiendo un recorrido por el Atlántico, generó entre el 26 y 27 de agosto vientos de 12.6 m/s de velocidad y un oleaje de 3.5 m en el Caribe; su influencia en el oleaje de la boya se aprecia hasta el último día de agosto.

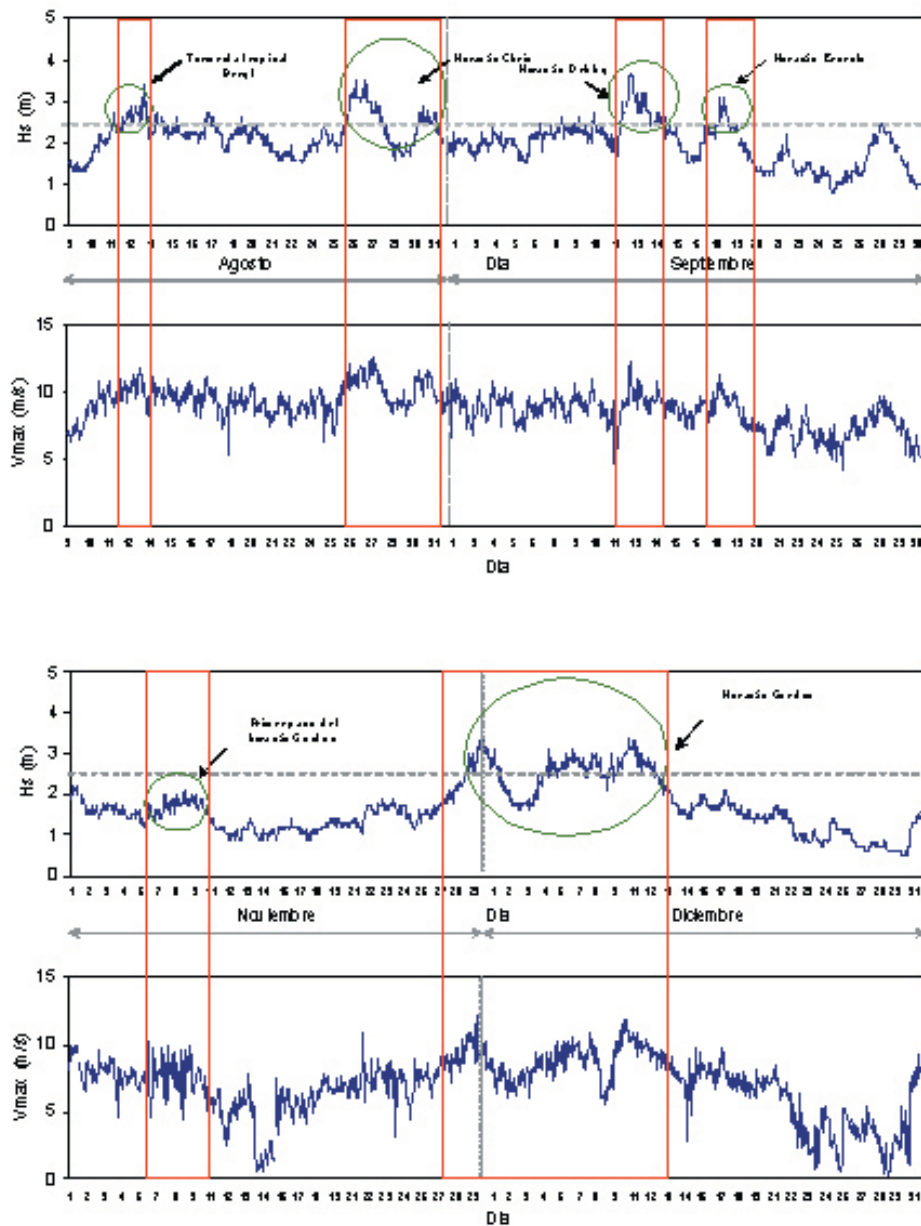


Figura 6. Registros de H_s y V_{max} entre agosto y diciembre de 1994 en la boya NOAA 41018.

Aún cuando la tormenta tropical Debby no llegó sino hasta las costas de Venezuela, el instrumento analizado registró alturas de ola significativa de 3.7 m y velocidades del viento similares a las registradas por Chris. La causa de que este evento haya generado valores de H_s mayores con vientos de menor intensidad que los demás episodios se puede explicar por la mayor longitud del fetch que hay entre las Antillas Menores y Jamaica. La tormenta tropical Ernesto y el huracán Gordon registraron, respectivamente, alturas de ola significativa

de 3.1 m y 3.4 m con vientos de 11.3 m/s y 12.2 m/s de velocidad.

Con los datos de H_s y V_{max} de estos cinco eventos es posible plantear, entonces, la relación $H_s = \alpha V_{max}$ para los datos del Caribe colombiano. Utilizando todos los valores de altura de ola significativa mayores que 2.5 m y la velocidad del viento asociada en la boya NOAA 41018, se puede obtener el histograma de frecuencias de α que se presenta en la figura 7. Como se observa, los valores más probables de α se encuentran entre 0.25 y 0.35.

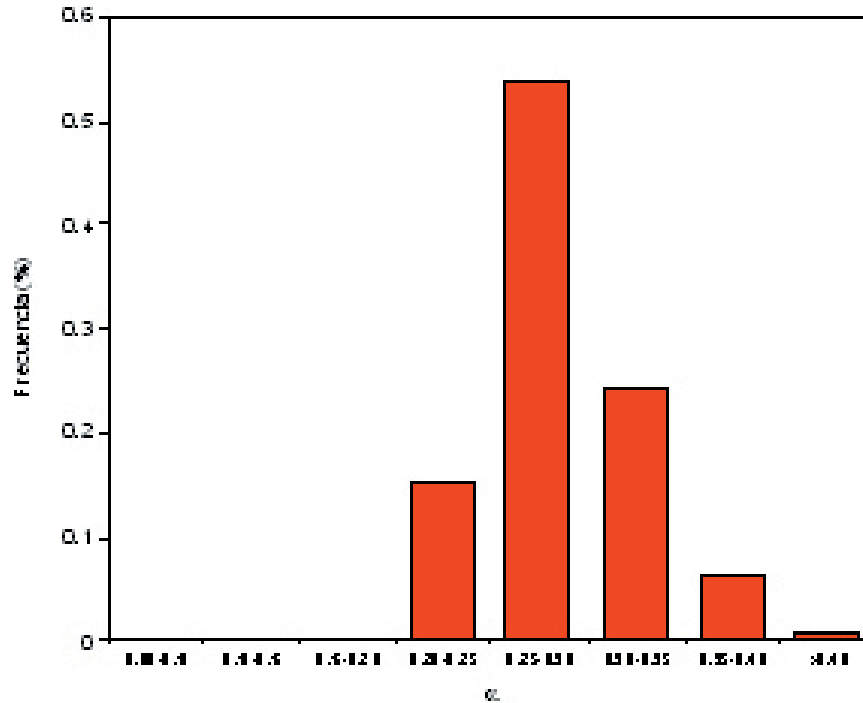


Figura 7. Histograma de α de las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018.

Con el objeto de dar más confiabilidad a las expresiones encontradas, se han analizado los reportes escritos de diferentes tormentas tropicales en el Mar Caribe y en el Golfo de México. Dichos reportes contienen datos de H_s y V_{max} en boyas de la NOAA y registros de barcos que en un momento determinado se encontraban cerca de la trayectoria. Se han descartado aquellos datos de barcos en ruta que se encontraban lejos de la tormenta. En la tabla 1 se presentan los datos utilizados y un cálculo de α para cada uno de ellos. Obsérvese que α es, en todos los casos, del orden de 0.20-0.40, en clara concordancia con los datos de la boya NOAA 41018; el valor medio es de 0.28.

Por otra parte, sabemos que α ha sido planteado considerando datos registrados por instrumentos que se localizan en la superficie del mar. No obstante, los datos con los que se cuenta para construir los regímenes de oleaje de tormentas tropicales son observaciones hechas desde satélite, a partir de las cuales se extrae y procesa la

información de velocidad del viento y presión atmosférica. Esta extracción y procesamiento de datos tiene asociado un error, tal como puede concluirse de los reportes de la NOAA sobre cada evento, en los que muestran la evolución de la velocidad del viento, V_v , en el ojo de la tormenta. Nótese, por ejemplo, la variabilidad de datos registrados durante la trayectoria del huracán Gordon, observado entre noviembre y diciembre de 1994 (figura 8).

Esto quiere decir que puede haber una diferencia entre la velocidad del viento estimada a partir de las observaciones de satélite y la velocidad del viento registrada en una boya. Es necesario, entonces, hacer una corrección adicional a las expresiones encontradas asociada a las diferencias entre los valores de ambos sistemas de medición, satélite y boya. Con los datos de 1994 registrados en la boya NOAA 41018 se ha obtenido dicho coeficiente de corrección, β . La figura 9 presenta los resultados. Nótese que β se encuentra entre 3 y 5, estando el valor más probable alrededor de 4.0.

Tabla 1. Cálculo de α para diferentes datos reportados por la NOAA.

| Año | Evento | Fecha del evento | Hs (m) | Vmax (m/s) | Tipo de Observación | Fecha de las observaciones | Sitio de Estimación o Registro | α |
|------|---------|-----------------------|--------|------------|---|----------------------------|--|----------|
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 7.83 | 26.24 | Registro de la boyea NOAA 42003 | 26/06/1998 | 25.9N, 89.9W (Golfo de México) | 0.30 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 7.50 | 22.12 | Registro de la boyea NOAA 42039 | 27/06/1998 | 28.8N, 86.0W (Golfo de México) | 0.34 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 5.80 | 17.49 | Registro de la boyea NOAA 42036 | 27/06/1998 | 28.5N, 84.5W (Golfo de México) | 0.33 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 11.90 | 27.78 | Registro de la boyea NOAA 42040 | 27/06/1998 | 29.2N, 88.3W (Golfo de México) | 0.43 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 5.33 | 22.64 | Registro de la boyea NOAA 42007 | 28/06/1998 | 30.1N, 88.8W (Golfo de México) | 0.24 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 4.37 | 19.55 | Estimaciones del barcoWFLG | 22/09/1998 | 29.5N, 66.4W | 0.22 |
| 1998 | Georges | 15/09/1998-01/10/1998 | 3.27 | 18.01 | Estimaciones del barcoDHPK | 23/09/1998 | 23.3N, 71.9W | 0.18 |
| 1998 | Mitch | 22/10/1998-05/11/1998 | 4.87 | 19.03 | Registro de la boyea NOAA 42003 | 05/11/1998 | 25.9N, 85.9W (Golfo de México) | 0.26 |
| 1998 | Mitch | 22/10/1998-05/11/1998 | 4.57 | 19.03 | Registro de la boyea NOAA 41010 | 05/11/1998 | 28.9N, 78.5W (Golfo de México) | 0.24 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 4.33 | 19.03 | Estimaciones del barco ZCBB9 | 26/08/1999 | 26.5N, 47.0W | 0.23 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 5.33 | 18.52 | Estimaciones del barcoELUU6 | 26/08/1999 | 26.5N, 51.8W | 0.29 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 5.33 | 19.55 | Estimaciones del barcoELUU6 | 26/08/1999 | 26.8N, 51.7W | 0.27 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 7.67 | 30.87 | Estimaciones del barcoELUU6 | 26/08/1999 | 26.9N, 51.4W | 0.25 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 10.00 | 31.90 | Estimaciones del barcoELUU6 | 27/08/1999 | 27.1N, 51.1W | 0.31 |
| 1999 | Cindy | 19/08/1999-31/08/1999 | 5.33 | 20.58 | Estimaciones del barcoELUU6 | 27/08/1999 | 27.4N, 49.8W | 0.26 |
| 1999 | Floyd | 07/09/1999-17/09/1999 | 16.67 | 37.04 | Registro de la boyea NOAA 41010 | 15/09/1999 | 105 mi náuticas al ENE de Cabo Cañaveral | 0.45 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 7.67 | 20.58 | Estimaciones del barco WCPU | 19/09/1999 | 25.6N, 86.7W | 0.37 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 5.33 | 20.58 | Estimaciones del barco PFFV | 20/09/1999 | 25.3N, 85.8W | 0.26 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 5.00 | 20.58 | Estimaciones del barco WCHF | 20/09/1999 | 25.0N, 84.8W | 0.24 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 6.00 | 24.18 | Estimaciones del barco WCOB | 20/09/1999 | 25.7N, 85.2W | 0.25 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 4.00 | 20.58 | Estimaciones del barco Carnival Cruise Line | 20/09/1999 | 26.2N, 83.6W | 0.19 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 3.33 | 18.01 | Estimaciones del barco Carnival Cruise Line | 21/09/1999 | 26.0N, 83.3W | 0.19 |
| 1999 | Harvey | 19/09/1999-22/09/1999 | 5.47 | 23.15 | Estimaciones del barco WCOB | 21/09/1999 | 25.5N, 79.7W | 0.24 |

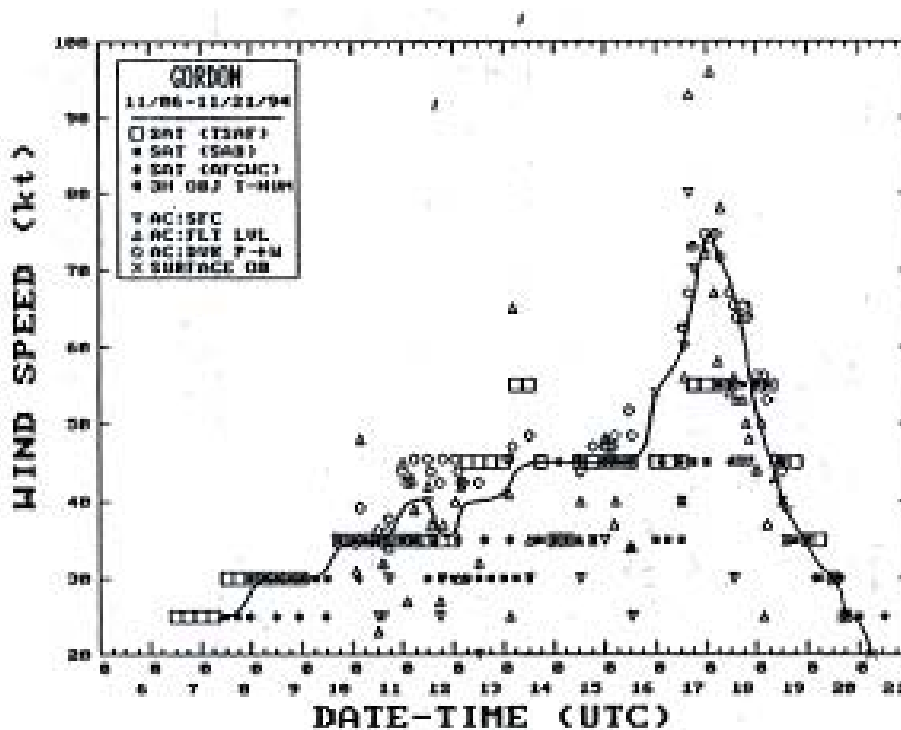


Figura 8. Velocidad del viento, V_v , estimada por satélite durante el huracán Gordon (nov-dic/94). Fuente: NOAA. Nota: Los valores de V_v están en nudos.

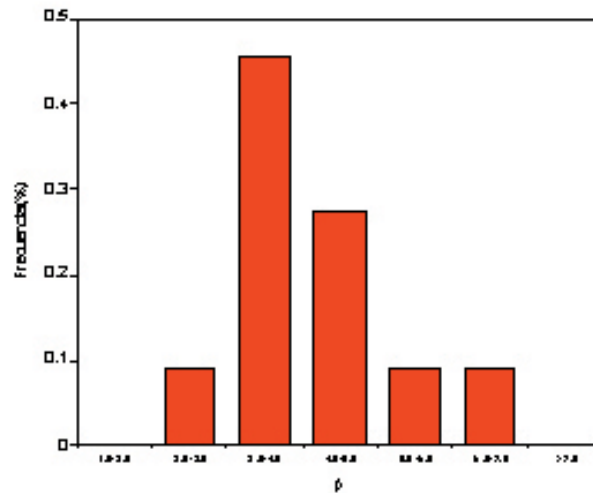


Figura 9. Histograma de β de las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018.

Generación de datos de período de pico, T_p : Siguiendo una metodología similar a la empleada por Kumar et al. (2003), se ha buscado una relación entre la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , para las épocas de temporal. Teóricamente no existe ninguna relación entre estas dos variables en un punto cualquiera de una superficie real de agua, por cuanto las zonas de generación de oleaje suelen ser diferentes en cualquier sitio. Sin embargo, dada la génesis del oleaje en el Mar Caribe, generados en la misma cuenca que forma con las Antillas,

Centro y Sur América, es posible inferir que los períodos de pico de los oleajes provocados por tormentas tropicales son del mismo orden de magnitud. Esta hipótesis puede corroborarse mirando los datos de la boya NOAA 41018 entre agosto y diciembre de 1994, época de huracanes de dicho año. Así las cosas, plantear una relación entre H_s y T_p es perfectamente factible. Esta relación puede verse en la figura 10. Como se observa, es una expresión potencial con coeficiente 5.7 y exponente 0.36, similar a la encontrada por Kumar et al. (2003).

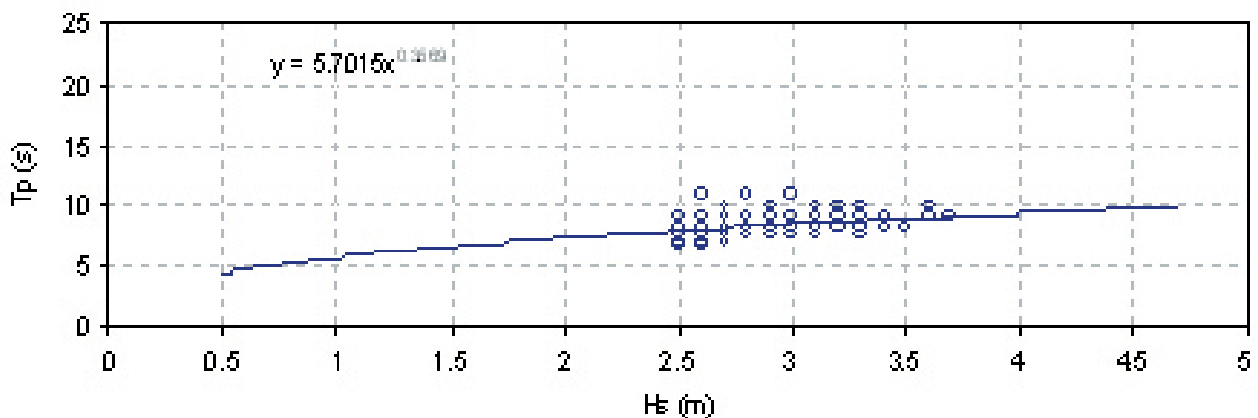


Figura 10. H_s vs. T_p durante las tormentas de 1994 en la boya NOAA 41018.

Zona de influencia de las tormentas tropicales en el régimen de oleaje de temporal: Si bien la influencia de una tormenta tropical en el Caribe colombiano depende de la trayectoria que siga y de R , diferente para cada uno y para cada instante del mismo, se pueden identificar familias de

tormentas en función de la trayectoria seguida. Así, por ejemplo, en la figura 5 se pueden diferenciar cuatro familias: 1.) Atlántico lejano, generadas en la zona con coordenadas [(10°N, 20°W), (25°N, 40°W)] y cuya trayectoria no supera los 50°W (lo que limita su influencia sobre el oleaje del Mar

Caribe); son tormentas que rápidamente se convierten en tormentas extratropicales. 2.) Atlántico cercano, generadas en la misma zona que las anteriores, pero con una trayectoria que se aproxima mucho al Mar Caribe. Muchas de ellas se encuentran con la barrera de islas caribeñas y continúan su trayectoria sobre tierra hasta convertirse en tormentas extratropicales. Algunas alcanzan a llegar a la costa este de Estados Unidos. 3.) Golfo de México, generadas en la zona marítima del mismo nombre, su trayectoria corta las lleva hasta la costa sur de Estados Unidos. 4.) Caribe. Se generan en el Mar Caribe y se disipan cuando llegan a cualquier zona costera que se encuentran, ya sea Centroamérica, islas caribeñas o el sur de Estados Unidos.

pico, T_p . Para la obtención de éstos se ha utilizado la base de datos de barcos en ruta (COADS) corregida mediante los mismos polinomios de ajuste encontrados para la boya NOAA 41018. Los datos analizados, en total 60.855 datos, corresponden al cuadrante de coordenadas $\{(8N, 74W), (11N, 80W)\}$, una superficie aproximada de 350×700 km. Esta base de datos ha sido filtrada con el objeto de eliminar datos erróneos y "outliers". De esta manera, la cantidad de datos con los que se ha trabajado es de 25.949, la base de datos de oleaje calibrada más completa que se tiene de la zona de estudio.

A partir de esta misma base de datos se analizó la distribución según las direcciones del oleaje, considerando sectores de $22,5^\circ$. Se puede ver en la rosa de oleaje obtenida, para los datos corregidos de COADS en la zona de estudio (figura 11), que el oleaje reinante en la zona de estudio es el que proviene del NE, con una probabilidad de ocurrencia del 32%. También tienen cierta relevancia los oleajes del ENE, NNE y N, representando cada uno entre un 10% y un 15%. Los demás oleajes, casi todos ellos debidos al viento local, representan el 20% restante.

RESULTADOS

Regímenes medios

Los regímenes medios que se presentan son los escalares de los parámetros del estado de mar, altura de ola significativa, H_s , y del período de

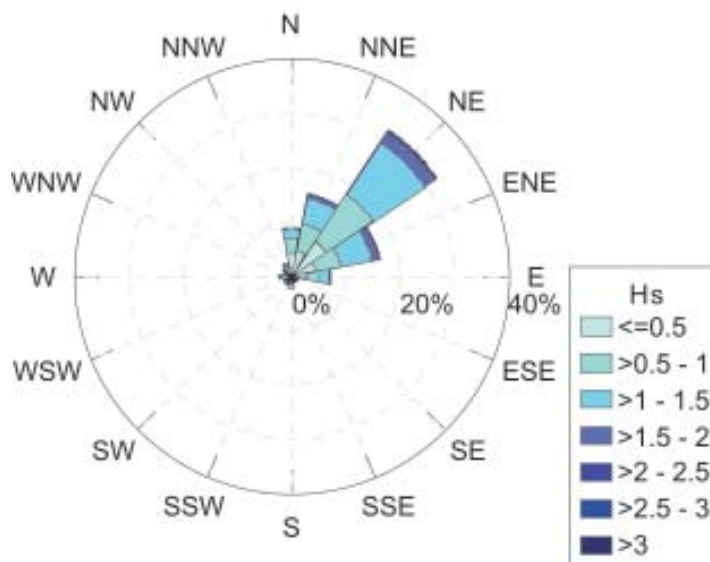


Figura 11. Rosa de oleaje medio para la zona de estudio (Sea y Swell).

Los regímenes medios de altura de ola significativa y período de pico se ajustaron a una función de distribución Gumbel de máximos. La figura 12 muestra el régimen medio escalar de H_s en la plataforma exterior.

Obsérvese que la altura de ola significativa superada el 50% del tiempo es de 1.5 m; los diferentes regímenes se separan más en la parte alta de los ajustes y para una probabilidad del 99.5%, la altura de ola significativa es de 3.6 m.

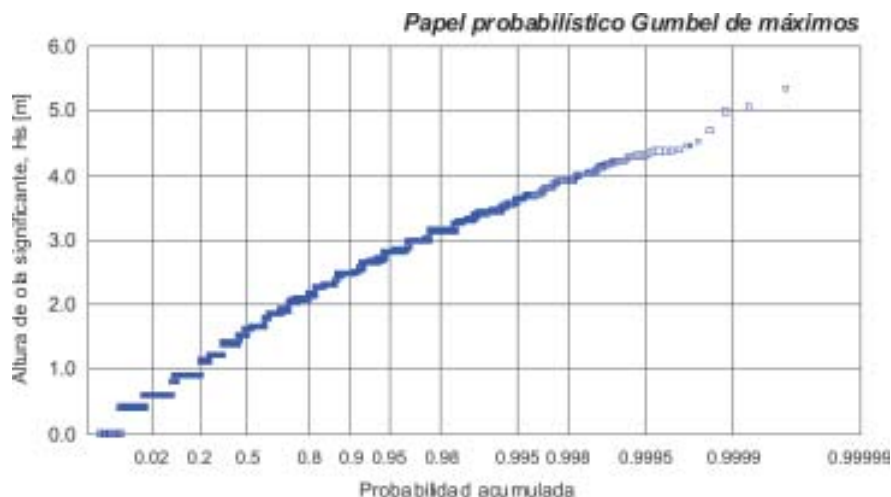


Figura 12. Régimen escalar de H_s en profundidades indefinidas.

Regímenes de temporal

Después del exhaustivo análisis realizado para todas las tormentas tropicales de 1994, con el cual se establecieron algunas expresiones que permiten obtener la altura de ola significativa, H_s , y el período de pico, T_p , es posible entonces obtener el régimen de estas variables para condiciones de tormenta. Se han analizado todos los registros sobre tormentas tropicales en el Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México de los últimos 20 años, desde 1985 hasta 2004. En total han sido 220 eventos estudiados, de los cuales se han analizado con detalle cerca de 60 eventos en la zona de estudio. El análisis ha seguido la siguiente metodología:

1. Determinación de los eventos que afectan al oleaje del Mar Caribe colombiano mediante el estudio de las trayectorias seguidas por cada uno de ellos.

2. Cálculo de H_s en cada punto de análisis (que corresponde al sitio de estimación de variables realizado cada 6 horas por la NOAA) para cada tormenta, mediante la aplicación de la expresión:

$$H_s = \frac{\alpha}{\beta} V_{max}$$

3. Para la determinación del régimen extremal en un determinado punto, en este caso profundidades indefinidas, se busca la mayor altura de ola significativa de cada uno de los años de la base de datos y se obtiene la probabilidad acumulada, $i/(n+1)$, y el período de retorno asociado, $T_r = 1/(1-P)$.

4. Estimación de T_p mediante el uso de la velocidad del viento estimada por satélite y de los parámetros α y β .

5. Ajuste del régimen de H_s y de T_p de temporales en profundidades indefinidas a un papel probabilístico Gumbel de máximos.

La figura 13 muestra la velocidad del viento máxima de las tormentas tropicales que desde 1985 influyeron sobre el área de estudio. Obsérvese la modulación bianual y la tendencia de aumento en el argo plazo, comportamiento similar encontrado por Smith et al. (2002). Debido a la proporcionalidad encontrada en el apartado 3, es de esperar que este comportamiento se observe también en la altura de ola significativa.

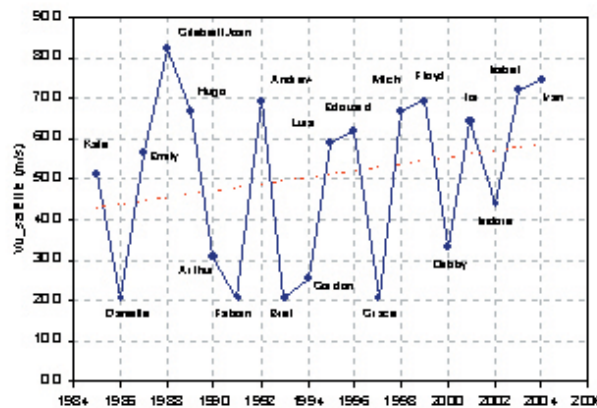


Figura 13. Evolución de la intensidad del viento en el ojo de las máximas tormentas tropicales de cada año en el Caribe desde 1985.

Siguiendo esta metodología, el régimen de temporal de H_s en profundidades indefinidas de la zona de estudio es el que se presenta en la figura 14. Las líneas punteadas en rojo corresponden a las bandas de confianza asociadas a la variabilidad de los parámetros α y β ; dicha variabilidad está, a su vez, relacionada con la desviación estándar de la función de distribución de la muestra de α y β . Los resultados obtenidos son altamente

coincidentes a los encontrados, mediante modelación numérica dentro del proyecto CARIMOS (CARibbean sea Metocean Statistics), por Calverley et al. (2002) para otros puntos del Mar Caribe, lo que valida no sólo estos datos sino la metodología empleada para obtenerlos. Obsérvese que la altura de ola significativa con un periodo de retorno de 36.57 años es de 6.63 m, mientras que para 50 años es de 6.85 m.

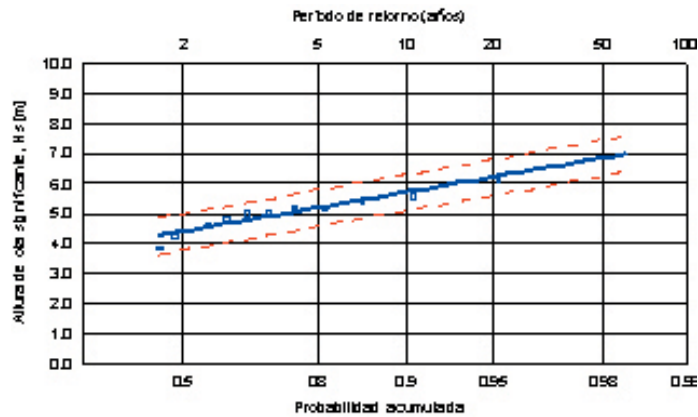


Figura 14. Régimen de temporales en profundidades indefinidas

DISCUSIÓN

Se han establecido los parámetros de ajuste de los datos de oleaje visual para el Caribe colombiano. Estos parámetros pueden suponerse invariables espacial y temporalmente para aplicarlos a cualquier base de datos de oleaje visual del Mar Caribe.

Se ha determinado que la altura de ola significativa producida por el paso de tormentas tropicales es proporcional a la velocidad del viento estimada por los satélites. Debe aplicarse una doble corrección. La primera de ellas, α , se debe a la transferencia de energía de la atmósfera (por medio del viento y la presión atmosférica) al océano. La segunda, $1/\beta$, está asociada a los errores en el registro de la velocidad del viento por el satélite. Es decir:

$$H_s = \frac{\alpha}{\beta} V_{max}, \text{ donde } \alpha = 0.30 \text{ y } \beta = 4.0.$$

El periodo de pico está potencialmente relacionado con la altura de ola significativa en época de tormentas. La expresión que relaciona estas variables es:

$$T_p = \delta H_s^\eta, \text{ donde } \delta = 5.7 \text{ y } \eta = 0.36.$$

El oleaje de temporal en el Mar Caribe está fuertemente influenciado por las tormentas tropicales desarrolladas en las zonas del Atlántico cercano, Golfo de México y Caribe. Solamente aquellas que se generan en el Atlántico lejano tienen muy poca influencia en la zona de estudio.

Nota

La presente investigación ha estado vinculada al proyecto “ESTudio Y Evaluación De Alternativas De Solución Para La PROtección Costera De Unos Sectores De La Costa Caribe Colombiana Fase II”, realizado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, de la Dirección General Marítima de Colombia, DIMAR, con la capacitación y asistencia técnica de Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, P. (2003). *Cota de Inundación del Litoral Pacífico Colombiano. Tesina de Máster.* Universidad de Cantabria. p. 85.
 A&T S. A. (2005). *Clima de oleaje en el Caribe colombiano.* Reporte interno.
 Banton, J. D. (2002). *Parametric Models and*

- Methods of Hindcast Analysis for Hurricane Waves. IHE/Alkyon. MSc. Thesis Report.
- Calverly, M. J., D. Szabo, V. J. Cardone, E. A. Orelup y M. J. Parsons (2002). Wave climate study of the Caribbean Sea. Proceedings of 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting.
- Cooper, C. K. (1988). Parametric Models of Hurricane-Generated Winds, Waves and Currents in Deep Water. Proceedings of 20th Annual OTC, Houston, Texas, USA. pp 475-484.
- Dirección General de Puertos de España (1991). Estudio sobre las observaciones visuales de barcos en ruta del N.C.D.C. *Programa de Clima Marítimo*. (46).
- Goda, Y. (1988). On the Methodology of Selecting Design Wave Height. Proceedings of the 21st International Conference in Coastal Engineering. pp. 899-913.
- Hogben, N. y F. Lumb (1967). *Ocean Wave Statistics*. National Physical Laboratory. HMSO, London, United Kingdom.
- Hsu, S. A., Jr. M. F. Martin, B. W. Blanchard (2000). An evaluation of the USACE's deep water wave prediction techniques under hurricane conditions during Georges in 1998. *Journal of Coastal Research*. 16, (3), pp. 823-829.
- Hsu, S. A., Z. Yan (1998). A note on the radius of maximum wind for hurricanes. *Journal of Coastal Research*. 14, pp. 667-668.
- Jardine, T. P. (1977). The reliability of visually observed wave heights. *Coastal Engineering*, 3, pp. 33-38.
- Kumar, V. S., S. Mandal, K. A. Kumar (2003). Estimation of Wind Speed and Wave Height during Cyclones. *Ocean Engineering*, 30, pp. 2239-2253.
- Ochi, M. K. (1998). *Ocean Waves - The Stochastic Approach*. Cambridge Ocean Technology Series, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Smith, D., P. Warner, J. Banton (2002). Long Term Variability of Hurricane Trends and a Monte Carlo Approach to Design. Proceedings of the International Conference in Coastal Engineering. pp 34-38.
- Tejada, C. E. (2002). Clima marítimo de la bahía de Tumaco, un caso de aplicación del sistema de modelado integral de zonas costeras para Colombia. Tesina de Máster. Universidad de Cantabria.
- Tejada, C. E., M. González, L. Otero (2004). Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las Aguas Jurisdiccionales colombianas. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro (Brasil).
- USACE (1984). *Shore Protection Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center (CERC), Vicksburg, Mississippi, 2 vols.
- Young, I. R. (1988). Parametric Wave Prediction Model. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 114, (5), pp. 637-652.
- Young, I. R. and Burchell, G. P. (1996). Hurricane Generated Waves as Observed by Satellite. *Ocean Engineering*, 23, (8), pp.761-776.