



## ARTÍCULO

# Aplicación de un modelo paramétrico de vientos y un modelo de oleaje espectral para el estudio del oleaje máximo generado por el huracán Lenny, en las costas del Caribe colombiano en 1999

Application of a wind parametric model and a spectral wave model to study maximum waves generated by hurricane Lenny, in the Colombian Caribbean coasts in 1999

Fecha recepción: 2009-06-18 / Fecha aceptación: 2009-10-28

Juan Carlos Ortiz Royero, jortiz@uninorte.edu.co

Departamento de Física, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA,  
Universidad del Norte

## Resumen

De acuerdo con el Centro de Previsión del Tiempo de México, el 13 de noviembre de 1999 se formó la depresión tropical No. 16 de la temporada a unos 300 km de la isla Gran Caimán, el día 14 fue elevada a tormenta tropical y llamada Lenny. Durante los siguientes tres días, después de lentos movimientos de traslación erráticos al principio, se desplazó hacia el Este-Sureste y luego hacia el Este-Noreste. En esta investigación se determinó la altura máxima de las olas generadas por el paso del huracán Lenny en las costas del Caribe colombiano, utilizando un modelo paramétrico de vientos de huracanes y el modelo espectral de oleaje SWAN. Se calcularon los valores de altura significativa cerca a las costas colombianas (isóbatas de 100 m). El Caribe colombiano tiene alrededor de 1819 km de línea de costa donde se ubican importantes ciudades desde el punto de vista económico y turístico, como Barranquilla, Santa Marta, Cartagena y Riohacha. En este trabajo se identificaron las zonas más golpeadas por el oleaje del huracán y por ende más vulnerables a un evento con estas características.

**Palabras claves:** Huracanes, oleaje extremo, modelo de vientos, modelo de oleaje.

## Abstract

According to the Weather Forecast Center of Mexico, on November 13, 1999, the tropical depression No. 16 of the season was formed some 300 Km from the Grand Cayman Island; on the 14<sup>th</sup> day it was classed as a tropical storm, called Lenny. For the next three days, after slow movements erratic in the beginning, the storm moved East-Southeast and then East-Northeast. In this research the maximum wave height generated with the passing of hurricane Lenny in the Colombian Caribbean coast was determined, utilizing a parametric hurricane wind model and the spectral model SWAN. The values of significant wave height in the Colombian coasts were calculated (isoline of 100 m). The Colombian Caribbean has around 1819 km of coast line where important economic and tourist cities are located such as Barranquilla, Santa Marta, Cartagena and Riohacha. The zones which were severely hit by the hurricane swell and which, hence, are more vulnerable to an event with these characteristics have been identified in this work.

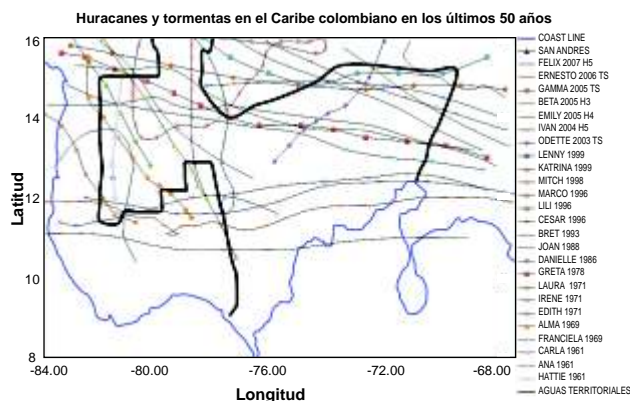
**Key words:** Hurricanes, extreme waves, wind model, wave model.

## Introducción

Entre los fenómenos naturales que más afectan las estructuras costeras está el oleaje. Este presenta condiciones variables en cuanto a su altura y período y es precisamente la altura (y en menor proporción el período) la que definirá el diseño de una estructura y por lo tanto sus elementos constitutivos. La vulnerabilidad en la zona establece la dirección a seguir para establecer los planes de mitigación y manejo de emergencias a las entidades que administran los recursos.

La costa Caribe colombiana ha sido golpeada directamente por tormentas muy pocas veces; Joan en 1988 y Bret en 1993 son algunos ejemplos. Estas tormentas que nacen en el Atlántico central se mueven regularmente en dirección Oeste-Noroeste, lo que permite que la costa colombiana no sufra el embate directo de las mismas. El huracán más significativo debido a la cercanía a la costa fue Joan en 1988, el cálculo del oleaje generado en aguas profundas ha sido descrito en [1].

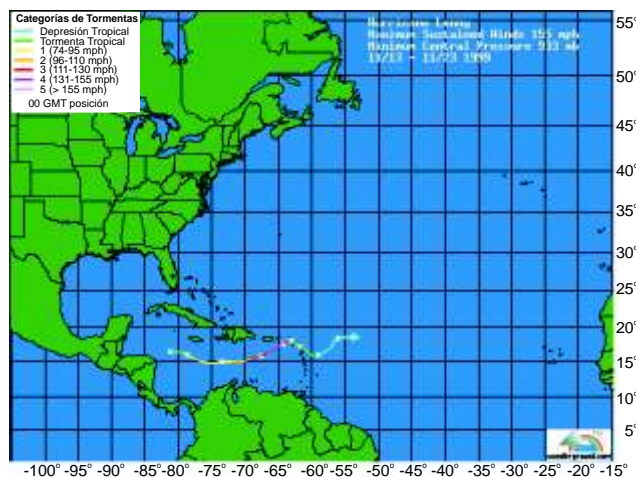
Más de 50 tormentas han cruzado aguas colombianas en los últimos 100 años [2], pero definitivamente en menor proporción que otras zonas del Caribe. La figura 1 muestra las trayectorias de los eventos que pasaron por aguas colombianas en los últimos 50 años.



**Figura 1.** Trayectorias de tormentas y huracanes en aguas colombianas desde 1960.

El huracán Lenny fue un evento muy particular comparado con las trayectorias típicas que cruzan la zona [3]. Nació como una tormenta tropical cerca a la isla Gran Caimán el 14 de noviembre de 1999 y su movimiento de traslación fue hacia el Este-Noroeste convirtiéndose en un poderoso huracán categoría 4 en la escala Saffir-Simpson. En una situación poco usual para esta época del año en el Atlántico, las aguas cálidas del Caribe favorecieron que el fenómeno se intensificara, y el día 17 por la mañana, el huracán Lenny presentó vientos máximos sostenidos de 215 km/h y ráfagas de 260 km/h, por lo que alcanzó la categoría 4 de la escala Saffir-Simpson, cuando se encontraba a 2325 km al este de Cozumel, Q.R. y a 75 km al sursuroeste de St. Croix. a las 15:00 horas.

Lenny alcanzó su máxima intensidad como huracán de categoría 4 con una presión barométrica central de 934 hPa, vientos máximos sostenidos de 240 km/h y ráfagas de hasta 295 km/h. Durante los días 18 y 19, mientras permanecía semi-estacionario sobre el Noreste del Caribe, Lenny se debilitó rápidamente, pasando de la categoría 4 a la categoría 1. Su trayectoria puede verse en la figura 2.



**Figura 2.** Trayectoria del huracán Lenny en 1999 (www.wunderground.com).

Dado que los vientos máximos se encuentran en la pared del ojo y en la parte derecha del mismo [4] es de esperarse que las olas generadas por este huracán alcance mayores valores que uno de igual categoría en la dirección típica (hacia el Este-Noroeste), por lo tanto bajo esta premisa, la costa colombiana estaría en

una ubicación altamente vulnerable al oleaje generado por un evento de estas características.

### Área de estudio

El Caribe colombiano tiene alrededor de 1819 km de línea de costa y se ubican importantes ciudades desde el punto de vista económico y turístico como Cartagena, Barranquilla y Santa Marta. Para estudiar el oleaje máximo generado por Lenny se tomó una malla o grilla computacional lo suficientemente grande, de tal manera que se recoja todo el proceso de formación y posterior propagación del mismo hacia la zona costera colombiana. Para ello se tomó una malla computacional desde 68° Oeste hasta 84° Oeste y desde 7° Norte hasta 16° Norte. La figura 3 muestra el área de estudio para la influencia del oleaje generado por Lenny, las cruces rojas marcan la ubicación de Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Riohacha cuatro de las principales ciudades costeras colombianas.

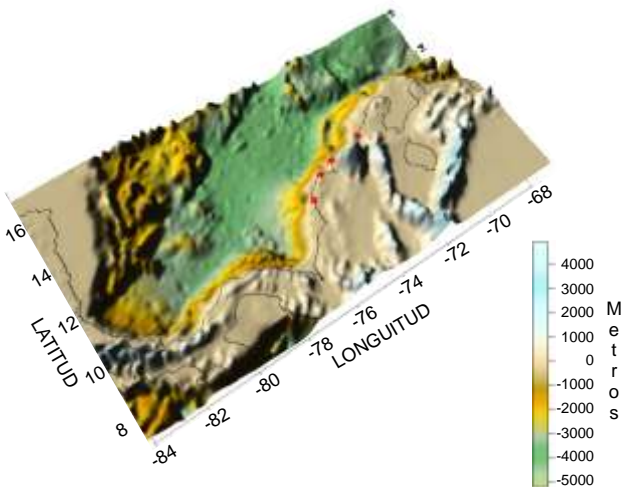


Figura 3. Batimetría de la zona de estudio. Las cruces rojas marcan la ubicación de izquierda a derecha de Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Riohacha respectivamente.

### Métodos

En la investigación realizada se usaron dos modelos; el modelo de vientos paramétricos de Visbal y Ortiz [5], basado en el modelo de Lizano [6]. Este modelo calcula el campo de vientos usando la información de datos de tormenta (vientos máximos, presión en el ojo y posición) que se encuentra en la base de datos

Hurricane Tropical Data [7] (HURDAT, de Unisys Weather (<http://weather.unisys.com/hurricane/index.html>)). En la figura 4 se muestra la información extraída de Hurricane Tropical Data para el huracán Lenny.

Date: 10-21 NOV 1999  
Hurricane LENNY

ALV	LAT	LOX	TIME	MINL	PP	STAT
1	16.50	-81.50	11/13/21Z	10	1002	TROPICAL DEPRESSION
2	15.50	-80.50	11/14/05Z	10	1002	TROPICAL DEPRESSION
3	15.50	-79.50	11/14/09Z	10	1002	TROPICAL DEPRESSION
4	15.50	-79.50	11/14/15Z	10	1002	TROPICAL DEPRESSION
5	16.40	-79.30	11/14/19Z	55	992	TROPICAL STORM
6	16.40	-78.90	11/14/21Z	60	988	TROPICAL STORM
6A	16.20	-78.00	11/15/00Z	70	960	HURRICANE-1
7	16.10	-78.30	11/15/03Z	70	988	HURRICANE-1
7A	15.60	-77.60	11/15/06Z	70	988	HURRICANE-1
8	15.90	-77.10	11/15/09Z	85	971	HURRICANE-2
8A	15.90	-76.70	11/15/12Z	85	971	HURRICANE-2
9	15.00	-76.20	11/15/15Z	85	971	HURRICANE-2
9A	14.80	-74.90	11/15/18Z	85	982	HURRICANE-2
10	14.50	-74.10	11/15/21Z	75	902	HURRICANE-1
10A	15.00	-73.50	11/16/00Z	75	902	HURRICANE-1
11	15.20	-73.00	11/16/03Z	70	902	HURRICANE-1
11A	15.20	-72.10	11/16/06Z	75	977	HURRICANE-1
12	15.20	-71.50	11/16/09Z	85	971	HURRICANE-2
12A	15.20	-70.60	11/16/12Z	85	971	HURRICANE-2
13	15.40	-69.10	11/16/15Z	85	971	HURRICANE-2
13A	15.40	-69.10	11/16/18Z	85	971	HURRICANE-2
14	15.50	-68.20	11/16/21Z	100	955	HURRICANE-3
14A	15.50	-67.00	11/17/00Z	100	960	HURRICANE-3
15	16.00	-67.00	11/17/03Z	100	958	HURRICANE-3
15A	16.30	-66.70	11/17/06Z	100	958	HURRICANE-3
15B	16.50	-66.20	11/17/09Z	105	952	HURRICANE-3

Figura 4. Información del huracán Lenny en 1999 tomada de HURDAT.

El modelo de vientos se basa en la parameterización de Collins [8] y Jelesnianski [9] calculando el campo de vientos basados en la información del radio de vientos máximos, la presión central y la posición del ojo. El modelo usado en este trabajo lee directamente la información de HURDAT y calcula el radio de vientos máximos de acuerdo a Willoughby [10]:

$$R_{max} = 46.29 \exp(-0.0153V_{max} + 0.0166\phi) \quad (1)$$

Donde  $V_{max}$  y  $\phi$  son el viento máximo y la latitud respectivamente (esta información es extraída directamente de HURDAT).

El modelo espectral de oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore) es un modelo, ampliamente utilizado en todo el mundo, de propagación de oleaje debido al viento, el cual basado en la ecuación de balance de la acción [11], calcula el oleaje y diferentes variables en zonas costeras. Su aplicación en escalas oceánicas ha sido utilizada en otros casos [12].

Desafortunadamente durante el paso de Lenny, no existen registros en boyas oceanográficas dentro de la zona de estudio para realizar la validación de los resultados, aún así el uso del modelo de vientos usado en esta investigación y modelos espectrales como WWIII (WaveWatch III) o SWAN ha sido validado en diferentes trabajos como en [13] y [1].

En ingeniería de costas es importante evaluar y conocer el oleaje en aguas profundas sin que pierda energía por fricción de fondo, así que se calcularon los parámetros de oleaje: altura significativa ( $A_s$ ), periodo pico (PP) y dirección promedio del oleaje (DIR) en la isóbata de 100 metros en puntos ubicados en la malla computacional al frente de cada localidad. Estos puntos serán etiquetados como CGT (Cartagena), BAQ (Barranquilla), STA (Santa Marta) y RIO (Riohacha).

La batimetría utilizada fue de la base de datos ETOPO 2 (2' de resolución) de la NGDC (National Geophysical Data Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de los Estados Unidos [14].

Los campos de vientos se calcularon a una resolución espacial de  $1/6^\circ$  y cada 6 horas de acuerdo a la información de HURDAT. El modelo de olas SWAN corrió a la misma resolución de los vientos, pero con un incremento en el tiempo de 1.5 horas (SWAN interpola los campos de vientos),  $10^\circ$  de resolución direccional y 21 bins en frecuencia. La versión utilizada en este trabajo fue la 40.72 y las

parameterizaciones escogidas están descritas en la tabla 1 [15].

Ya que el tiempo de simulación total fue de 54 horas y el incremento del tiempo fue de 1.5 horas, el modelo de olas generó un total de 36 campos de altura significativa. El interés particular era conocer la altura significativa máxima registrada en la zona costera, se tomaron las 36 matrices y se calculó la matriz máxima mediante una rutina usando Matlab 6.5. Esta rutina calcula el valor máximo de cada nodo correspondiente en cada una de las 36 matrices.

## Resultados

La figura 5 muestra el campo de altura significativa para la zona en cuatro fechas durante el paso del huracán Lenny y la figura 6 representa la matriz de los valores máximos calculados de cada nodo del dominio computacional durante el tiempo en que se hizo la simulación (desde el 15 de noviembre de 1999 a las 00 horas, hasta el 17 de noviembre de 1999 a las 06 horas para un total de 54 horas de simulación). Esto se obtiene con todos los campos (matrices) de altura significativa calculados con SWAN y mediante el uso de una rutina en Matlab se obtiene el valor máximo calculado en cada nodo correspondiente en cada matriz. Es como sacar el máximo de una serie de valores, con la diferencia que aquí son matrices. Nuevamente la zona de la costa que presentó los valores más altos se localizaron cerca de la costa de la península de la Guajira.

**Tabla 1.** Procesos físicos activados en el modelo SWAN.

Proceso	Autor
Crecimiento debido al viento (Whitecapping)	Janssen (1989, 1991)
Interacciones entre cuatro olas	Hasselmann <i>et al.</i> (1985)

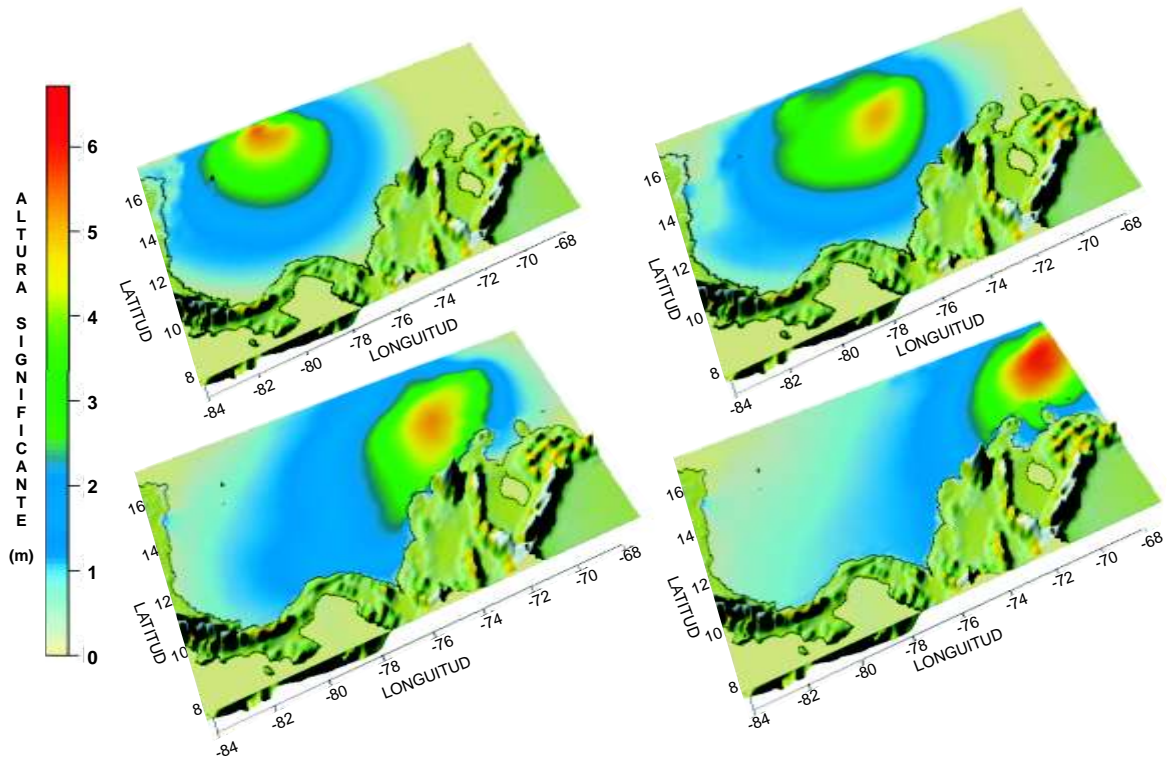


Figura 5. Altura significativa (m) durante el paso del huracán Lenny en la zona de estudio para cuatro fechas diferentes.

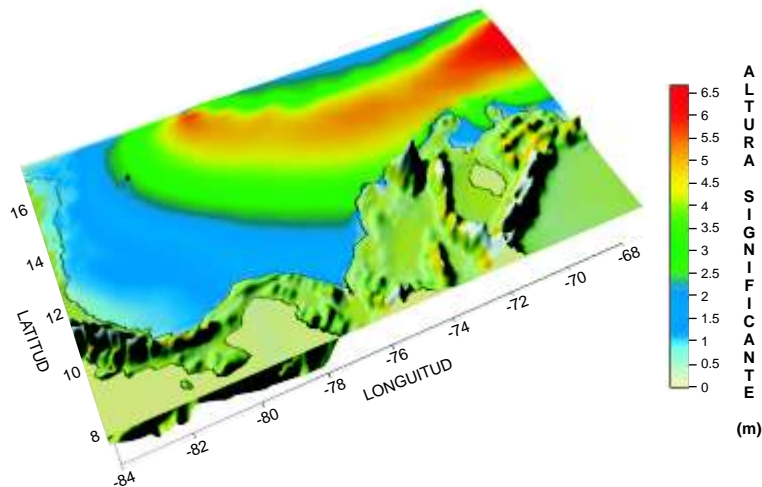
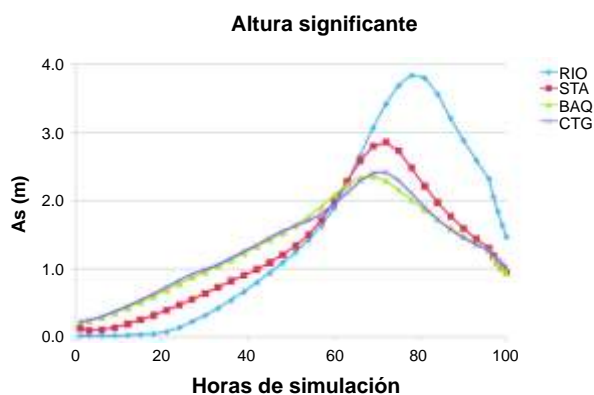


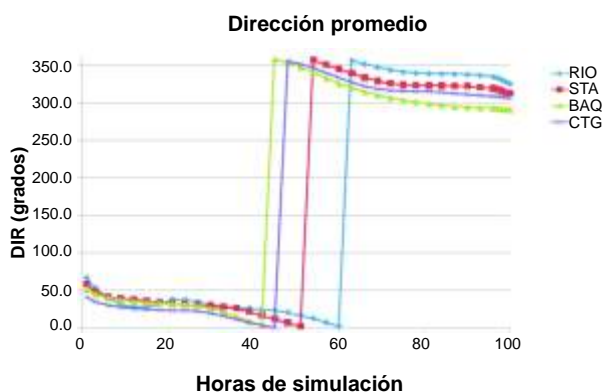
Figura 6. Altura significativa máxima recopilada durante el paso del huracán Lenny en la zona de estudio.

La figura 7 dividida en a, b y c muestran la serie de tiempo de *As*, *DIR* y *PP* para cada uno de los puntos de la malla descritos

anteriormente, así mismo la tabla 2 resume los valores de altura significativa máxima calculada para cada punto.



**Figura 7a.** Serie de tiempo de  $A_s$  (m) en cada uno de los puntos de estudio (isóbata de 100 m).



**Figura 7b.** Serie de tiempo de la dirección promedio del oleaje (grados) en cada uno de los puntos de estudio (isóbata de 100 m)



**Figura 7c.** Serie de tiempo del período pico (segundos) en cada uno de los puntos de estudio (isóbata de 100 m)

**Tabla 2.** Valores de  $A_s$  máxima,  $DIR$  y  $PP$  de los puntos escogidos.

Locación	$A_s$ (m)	$DIR$ (grados)	$PP$ (s)
RIO	3.8	339	10.9
STA	2.9	326	9.8
BAQ	2.4	310	9.8
CTG	2.4	316	9.8

## Discusión

El ojo del huracán Lenny estuvo más cerca de la costa colombiana el 16 de noviembre a las 18 horas a unos 400 km de la costa de la Guajira. Esto no representó peligro alguno dado que el efecto de los vientos de un huracán están generalmente confinados a un radio de unos 100 km del ojo del huracán [10]. A pesar que los vientos no generaron peligro a la costa, el mar de leva o marejada de fondo, conocido en inglés como *Swell*, tuvo un impacto notable en la zona. La  $A_s$  máxima (o pico) obtenida de 3.8 m en RIO es el valor más alto de todas las locaciones para el estudio. Históricamente esta península por ser la parte más sobresaliente de la costa colombiana, es la que recibe más directamente el oleaje extremo de las tormentas que cruzan el Caribe en cada temporada, en las otras tres locaciones se obtuvieron valores menores que en RIO. La localidad de BAQ y CTG no exhibieron diferencias notables en los valores del oleaje calculados, debido a su proximidad y dada la resolución del modelo.

En la historia del Caribe colombiano han sido pocos los huracanes que han entrado con suficiente proximidad para causar estragos en la población. Información recopilada de la región indica que en 1988 se presentó un huracán, que a su criterio es el que más daños y víctimas ha causado (JOAN), durante 1993 se presentó otro evento con características de tormenta tropical que tuvo un impacto poco significativo de acuerdo a la prensa local y el más reciente es el huracán *Lenny* (1999), del cual se tienen datos suficientes para calcular las condiciones marítimas que generó en la costa.

La altura significativa máxima calculada de 3.8 m, tiene un valor moderado para huracanes en Caribe, pero es significativa para una zona que presenta baja

probabilidad de sus efectos. La dirección media en cada locación nos muestra que la ola entra casi perpendicular a la zona, lo que la hace altamente peligrosa desde el punto de vista de ingeniería costera y los períodos picos calculados demuestran la presencia de una típica marejada de fondo. La ola máxima obtenida para Lenny (1999) en la zona de estudio fue de 6.5 m.

## Conclusiones

La línea de costa del Caribe colombiano se caracteriza por una plataforma regular y de suave pendiente, excepto la desembocadura del río Magdalena debido a la presencia del cañón submarino, lo cual favorece el análisis de ola máxima. Aunque no existen cálculos similares en la costa colombiana debido al paso del huracán Lenny, se puede concluir que un huracán como Lenny, a pesar de que la posición de su ojo no permitió el efecto directo de sus vientos golpear la línea de costa, su movimiento hacia el Este-Sureste facilitó la propagación de la marejada de fondo hacia las costas de una manera significativa. La Guajira representó la zona más vulnerable al oleaje con un valor máximo de 3,8 m en la isóbata de 100 m y cercano a Riohacha, la capital del departamento de la Guajira. Le sigue en vulnerabilidad Santa Marta, caracterizado por su importancia turística y comercial con 2.9 m y por último Barranquilla y Cartagena con 2.4 m. La dirección predominante durante el paso de Lenny fue de 330°, es decir el oleaje viene del noroeste, casi perpendicular a la línea de costa y con períodos típicos de la marejada de fondo entre 9 y 11 segundos.

Aunque para diseño de estructuras costeras se utiliza el concepto de olas de diseño basados en sus períodos de retorno, esta información es igualmente útil como referencia en las locaciones estudiadas. Un huracán con esta trayectoria es altamente desfavorable para la zona ya que el impacto de la marejada de fondo generado puede alcanzar valores importantes que podrían causar daños a la infraestructura costera.

## Agradecimientos

EL autor desea expresar su agradecimiento a la Dirección de Investigaciones y Proyectos (DIP) de la Universidad del Norte por el apoyo para la realización de esta investigación, así mismo a la Dirección

General Marítima (DIMAR) y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) del Ministerio de Defensa Nacional.

## Referencias bibliográficas

- [1] Ortiz J.C., López F., Estrada E., y Bacca LF. Estudio y simulación del huracán JOAN sobre la costa Caribe colombiana incluyendo la isla de San Andrés en 1988. Revista de la Sociedad Colombiana de Física 2008; 40(2):444-446.
- [2] Ortiz, J.C. Huracanes y tormentas en el Caribe colombiano desde 1900. Boletín Científico CIOH 2007; 25:54-60.
- [3] Servicio Meteorológico Nacional de México [Página Web] [Actualizada 2008 diciembre 15; Citada 2009 junio 17]. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/>.
- [4] Young I.R. 1999. Wind generated ocean waves. Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, p. 146.
- [5] Visbal, J., y Ortiz, J.C. Simulación de Huracanes bajo el lenguaje Java a partir del modelo HURWIN (Hurricane Wind Model) para su aplicación sobre la Costa Caribe colombiana. Trabajo de grado en Ingeniería de Sistemas. Universidad del Norte 2006. p. 40-52.
- [6] Lizano, O.G. Modelo de vientos ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. Geofísica 1990; 33:75-103.
- [7] Unisys Weather Tropical Data Department [Página Web] [Actualizada 2007 febrero 1; Citada 2006 febrero 15]. Disponible en: <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.html>.
- [8] Collins, J.I and J. Viehnanman. A simplified empirical model for hurricane wind fields. Paper No. OTC 1346. Offshore Technology Conference, 1971.
- [9] Jelesnianski, C.P. SPLASH (Special program to list amplitudes of surges from hurricanes); part II: General tracks and variant storm conditions. NOAA, Tech. Memo. NWS TDL-52. Silver Spring, 1974.
- [10] Willoughby, H.E. and Rhan M. Parametric Representation of the Primary Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model. Monthly Weather Review 2004:3033-3048.
- [11] Booij, N. y Holthuijsen, L.H. Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models. Journal of Computational Physics 1987; 68:307-326.
- [12] Ortiz J.C. y Mercado A. An Intercomparison of SWAN and WAVEWATCH III models with data from NDBC-NOAA buoys at oceanic scales. Coastal Engineering Journal Japan 2008 marzo; 50(1):47-73.

[13] Lizano, O.G. Simulación de oleaje de huracán usando modelo de vientos paramétricos en un modelo de olas de tercera generación. *Boletín Científico CIOH* 2006; 24:36-47.

[14] ETOPO 2 data base from NGDC (National Geophysical Data Center) [Página Web] [Actualizada 2009 julio 15; Citada 2008 noviembre 10]. Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>.

[15] SWAN model, user manual. [Página Web] [Actualizada 2009 marzo 11; Citada 2009 julio 22]. Disponible en: [http://130.161.13.149/swan/online\\_doc/swanuse/swanuse.html](http://130.161.13.149/swan/online_doc/swanuse/swanuse.html).