

ANÁLISIS DE OLEAJE DEBIDO A EVENTOS EXTREMOS EN AGUAS PROFUNDAS PARA LA REGIÓN NORTE-OCCIDENTAL DE CUBA

- Luis Fermín Córdova-López •
- Martha Fontova-de los Reyes •

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba

Resumen

En el diseño de obras de defensa de costas, así como en los estudios de riesgo por fuertes penetraciones del mar en zonas costeras, contar con información de oleaje en aguas profundas a largo término de forma precisa es una cuestión de vital importancia para lograr diseños adecuados desde el punto de vista funcional y de los costos asociados con las obras de defensa. Se presenta un estudio estadístico, aplicando el método propuesto por el profesor Goda (1988) a las mediciones brindadas por una serie de boyas de la NOAA situadas en la región del Golfo de México, relacionando los eventos meteorológicos que han provocado inundaciones costeras en el litoral norte de la región noroccidental de la isla, principalmente en la ciudad de La Habana. Como resultado de este análisis, se presentan las distribuciones de probabilidad que más se ajustan a las mediciones, gráficos y tablas de los periodos de retorno asociados con los fenómenos extremos y la probabilidad de encuentro de los mismos, utilizando normas internacionales.

Palabras clave: olas, oleaje extremo, periodo de retorno, probabilidad de excedencia, boyas.

Introducción

El diseño de obras de defensa de costa requiere de información básica de clima marítimo de buena calidad, fundamentalmente en aguas profundas, que permita a los ingenieros, después de la transformación de la ola a la zona de colocación de las estructura, realizar un diseño satisfactorio. La elección de un valor de altura y periodo de diseño irán ligados a una probabilidad de presentación del evento y riesgo definido, de acuerdo con la importancia de la obra.

En el caso particular de la región noroccidental de la isla de Cuba, existen diferentes fuentes de información nacional e internacional que difieren en magnitud, presentándose un problema para los ingenieros en el momento de definir los parámetros de diseño en cuanto al oleaje en aguas profundas. El trabajo que

se presenta tiene como objetivo fundamental brindar mayor claridad sobre este aspecto.

Desarrollo

Materiales y métodos

Presentación de la información brindada por el INSMET de Cuba

En Cuba, el Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba (INSMET) ha sido el encargado de presentar la información de clima marítimo extremo, la cual es utilizada por los especialistas en el diseño de obras costeras y marítimas. En el cuadro 1 se muestra la información resumida, que será comparada con los resultados presentados en este trabajo (Mitrani *et al.*, 2000).

Cuadro 1. Resultados del Instituto de Meteorología de Cuba.

Periodo de retorno (casos/año)	Periodo T (seg.)	Altura significativa H_s (m)
1/5	10.00	6.00
1/10	10.57	7.95
1/20	10.98	9.06
1/50	11.04	10.34
1/100	11.55	11.93

Definición de las boyas

Para el tratamiento estadístico se toman los datos que brindan las boyas de la National Oceanic and Atmospheric Administration's National Data Buoy Centre del gobierno de los Estados Unidos de América (NOAA). Las boyas que se utilizan para el análisis estadístico son la 42002 (25.79 N, 93.666 W), profundidad igual a 3 566.16 m; la 42001 (19.87 N, 85.06 W), profundidad igual a 3 246 m, y la 42003 (25.96 N, 85.59 W), profundidad igual a 3 282.7 m; todas ubicadas en el Golfo de México, como se muestra en la figura 1.

Metodología aplicada para la selección de los eventos meteorológicos

La determinación del valor de altura de ola se basó en la dirección de los vientos, trayectoria en caso de huracanes y altura de ola, teniendo en cuenta el momento de la penetración del mar en ciudad de La Habana, así como el tiempo aproximado de traslación del oleaje.

Las alturas de ola utilizadas para el análisis estadístico coinciden con la mayor registrada por las boyas para cada tormenta. Las boyas antes citadas han sido azotadas por 17 frentes fríos, una tormenta tropical, ocho bajas

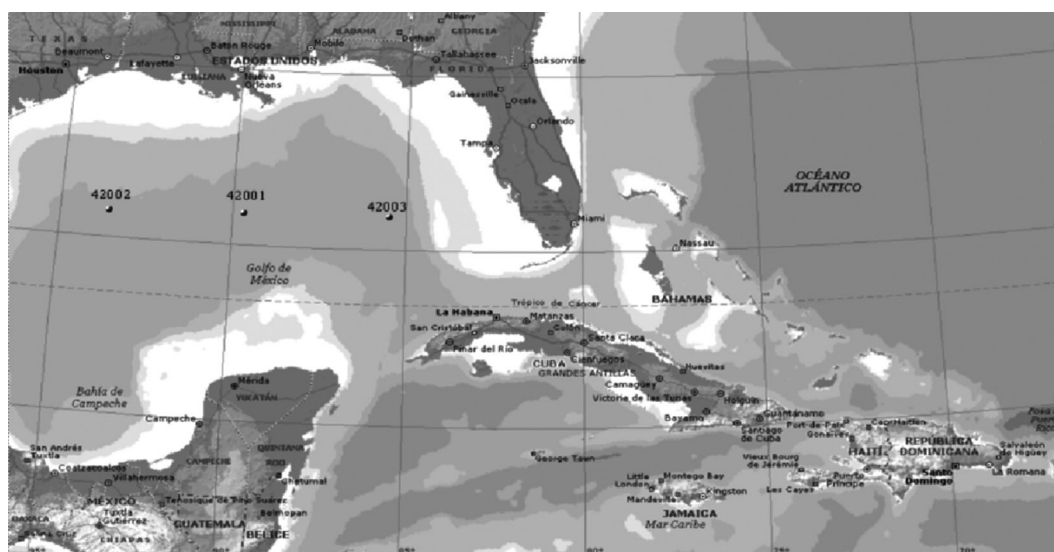


Figura 1. Ubicación geográfica de las boyas 42002, 42001 y 42003.

tropicales y seis huracanes, que han provocado inundaciones costeras en el litoral de la ciudad de La Habana. El número de fenómenos se acota en 32, de un total de 39, en los 31 años registrados (1975-2005).

En el cuadro 2 se muestran los 39 fenómenos meteorológicos que han provocado penetración del mar, registrados en las tres décadas inmediatas anteriores.

La fecha exacta del día que ocurrió la penetración del mar de los huracanes *Iván*, *Dennis* y *Rita* no está registrada hasta donde se ha tenido acceso. Teniendo en cuenta la información obtenida, se estiman los días en que pudo haber tenido lugar la penetración (entre dos y tres días), se corrobora con los datos medidos en las boyas, que compaginaron con las mayores alturas de olas registradas. H_{sm} representa la altura de ola pronosticada por el Instituto de Meteorología de Cuba, H_{sb} es la altura de ola significativa, representativa de la hora en que fue medida por la boya. El grado de intensidad en el cuadro se refiere a la intensidad de inundación.

De los tres registros de alturas de olas se tomó el mayor. Las celdas con pleca indican ausencia de datos. Los fenómenos marcados con * se eliminan de la muestra.

Tratamiento estadístico

El método usado para el análisis del régimen extremo es el desarrollado por Goda (1988), y Goda y Kobune (1990), que proponen las distribuciones de probabilidad Fisher-Tippett tipo I (FT-I) y las distribuciones tipo Weibull con parámetros ($k = 0.75, 1.0, 1.4, 2$). El análisis estadístico de las alturas de olas extremas se realizó en una hoja de cálculo Excel. A continuación se presentan las expresiones de las distribuciones propuestas por Goda (1988):

Fisher-Tippett tipo I (FT-I)

$$F(H_s \leq H'_s) = e^{-\left(\frac{H'_s - B}{A}\right)^k} \quad (1)$$

Weibull

$$F(H_s \leq H'_s) = 1 - e^{-\left(\frac{H'_s - B}{A}\right)^k} \quad (2)$$

Donde:

$F(H_s \leq H'_s)$: probabilidad de que H'_s no sea excedida.

H_s : altura de ola significativa.

H'_s : valor particular de altura de ola.

A : parámetro de escala.

B : parámetro de localización.

k : parámetro de forma.

Se realizan tres estimaciones, fijando tres umbrales de altura de ola distintos: tres, cuatro y cinco metros de altura de ola significativa, respectivamente. El criterio de rechazo de las distribuciones se basó en el coeficiente de correlación; el análisis mostró que la distribución que presenta mayor coeficiente de correlación es la distribución Weibull con $k = 1$. Como se aprecia en la figura 2, los valores obtenidos para los tres umbrales son muy similares, por lo que se toma la decisión de seleccionar el de altura de ola significativa de cuatro metros.

A continuación, en el cuadro 3 se muestran los resultados del tratamiento estadístico para el umbral de cuatro metros.

El próximo paso es la determinación del periodo de retorno, el cual está relacionado con la probabilidad de excedencia, que representa el número de años que deben transcurrir entre la presentación de dos temporales cuyas intensidades excedan una dada. El criterio más extendido para la selección del periodo de retorno de diseño es el propuesto por Borgman (1963), que relaciona periodo de retorno (Tr) con la probabilidad de riesgo (E) de presentación de ese valor durante la vida útil del proyecto (Lf), a través de la ecuación:

$$E = 1 - \left[1 - \frac{1}{Tr}\right]^{Lf} \quad (3)$$

Cuadro 2. Fenómenos meteorológicos que han provocado penetraciones del mar en el malecón habanero en los últimos 31 años.

Núm.	Fenómeno meteorológico	Fecha	H_{sm} (m)	Boya		Intensidad
				H_{sb} (m)	T_{pb} (seg)	
*1	Huracán <i>Eloise</i>	23 de septiembre de 1975	5.4	-	-	Fuerte
2	Frente frío	19 de enero de 1977	5.5	2.1	-	Fuerte
3	Frente frío	2 de marzo de 1980	4.2	5	10	Moderado
4	Frente frío	5 de noviembre de 1982	2.5	4.7	9.1	Débil
5	Baja tropical	17 de mayo de 1983	5.6	2.9	8.3	Fuerte
6	Frente frío	28 de febrero de 1984	4.3	6.4	12.5	Moderado
7	Frente frío	29 de marzo de 1984	3.6	5.8	11.1	Débil
8	Frente frío	23 de noviembre de 1984	3.1	3.4	9.1	Débil
9	Frente frío	4 de enero de 1985	3.7	4.5	9.1	Débil
10	Frente frío	12 de febrero de 1985	3.4	5.7	11.1	Débil
*11	Huracán <i>Juan</i>	28 de octubre de 1985	5.8	-	-	Fuerte
12	Huracán <i>Kate</i>	19 de noviembre de 1985	5.0	5.1	11.1	Moderado
13	Baja tropical	5 de enero de 1987	5.1	5.2	10	Fuerte
14	Frente frío	23 de enero de 1987	3.9	4.7	9.1	Débil
*15	Huracán <i>Floyd</i>	12 de octubre de 1987	5.2	-	-	Fuerte
16	Frente frío	25 de enero de 1988	3.5	4.3	10	Débil
17	Baja tropical	12 de abril de 1988	4.5	4.7	10	Moderado
18	Frente frío	15 de febrero de 1991	4.0	4.1	10	Débil
19	Baja tropical	6 de febrero de 1992	5.3	5.7	11.1	Fuerte
20	Baja tropical	13 de marzo de 1993	5.3	9.2	12.5	Fuerte
21	Baja tropical	3 de marzo de 1994	4.6	4.8	10	Moderado
22	Tormenta tropical <i>Gordon</i>	14 de noviembre de 1994	4.0	2.1	7.7	Débil
23	Baja tropical	23 de diciembre de 1994	3.8	3.5	9.1	Débil
24	Huracán <i>Opal</i>	4 de octubre de 1995	3.2	8.3	12.9	Débil
25	Frente frío	8 de enero de 1996	3.4	4.45	10	Débil
26	Frente frío	4 de febrero de 1996	3.6	3.41	8.33	Débil
27	Frente frío	8 de marzo de 1996	3.6	5.42	10.81	Débil
28	Frente frío	20 de marzo de 1996	2.6	4.57	9.09	Débil
29	Frente frío	14 de diciembre de 1997	3.8	5.36	10	Débil
30	Frente frío	27 de diciembre de 1997	3.3	4.33	9.09	Débil
31	Baja tropical	4 de febrero de 1998	4.7	6.57	11.43	Moderado
*32	Huracán <i>Georges</i>	25 de septiembre de 1998	4.0	-	-	Débil
*33	Huracán <i>Irene</i>	15 de octubre de 1999	4.0	-	-	Débil
*34	Huracán <i>Michelle</i>	Noviembre de 2001	7.0	-	-	Moderado
*35	Huracán <i>Charley</i>	Agosto de 2004	-	-	-	Moderado
36	Huracán <i>Iván</i>	Septiembre de 2004	-	11.04	12.9	Moderado
37	Huracán <i>Dennis</i>	Julio de 2005	-	6.02	18.79	Moderado
38	Huracán <i>Rita</i>	Septiembre de 2005	-	11.1	12.9	Moderado
39	Huracán <i>Wilma</i>	24 de octubre de 2005	> 6	5.96	10	Fuerte

T_{pb} : periodo pico registrado por las boyas del NOAA.

Intensidad: intensidad de la penetración del mar.

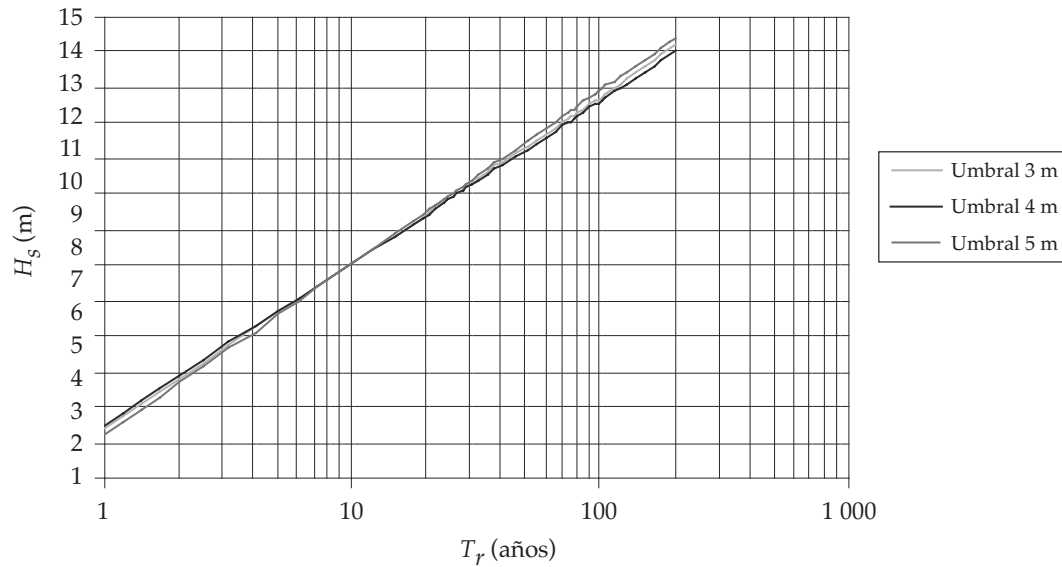


Figura 2. Variación de la altura de ola significativa calculada por el método de Goda, con el periodo de retorno para cada umbral.

Cuadro 3. Ajuste de datos extremos por el método de Goda.

$N = 26, N_T = 32, K = 31$ años, $\lambda = 1.03, n = 0.81, \sigma_{H_s} = 1.929, y_m =$ variable reducida $F(H_s \leq H_{sm}) = F_m =$ estimación de la probabilidad de no excedencia en 31 años.
FT-I: $A = 1.661, B = 4.384, r = 0.9585$
Weibull ($k = 0.75$): $A = 1.207, B = 4.141, r = 0.9699$
Weibull ($k = 1.0$): $A = 1.977, B = 3.51, r = 0.9714$
Weibull ($k = 1.4$): $A = 3.094, B = 2.561, r = 0.9577$
Weibull ($k = 2.0$): $A = 4.605, B = 1.197, r = 0.9378$

El cuadro 4 presenta las alturas significativas para diferentes periodos de retorno y sus intervalos de confianza, ya que se recomienda seleccionar una altura de ola con un mayor nivel de confianza.

En el cuadro 5 se muestra la probabilidad de encuentro para diferentes periodos de retorno y vida útil de las obras.

Las alturas de ola en metros corresponden a las calculadas para cada periodo de retorno y vida útil en años. La fila inmediata inferior a los valores de H_s representa los periodos de retorno en años y los números que llenan

el cuadro representan las probabilidades de encuentro; las probabilidades se dan en tanto por ciento.

Estimación del periodo de la ola para las boyas del NOAA

Para estimar el periodo de la ola correspondiente a las mediciones registradas por las boyas del NOAA se usó el método de Goda, al igual que para el cálculo de las alturas de ola. En esta oportunidad se hizo uso de todos los datos registrados, con un total de 32 eventos

Cuadro 4. Estimación de alturas de ola y periodos de retorno.

T_r (años)	H_s (m)	Confianza 80%	Confianza 85%	Confianza 90%	Confianza 95%	Confianza 99%
10	8.12	1.43	1.61	1.84	2.19	2.88
20	9.49	1.91	2.15	2.47	2.93	3.86
50	11.31	2.56	2.89	3.31	3.93	5.17
75	12.11	2.86	3.21	3.68	4.37	5.76
90	12.47	2.99	3.36	3.85	4.57	6.02
100	12.68	3.06	3.44	3.95	4.69	6.17

Cuadro 5. Probabilidad de encuentro para diferentes periodos de retorno y vida útil de la obra.

H_s (m)	6.75	8.12	9.49	11.31	12.68
Tr (años) L (años)	5	10	20	50	100
5	67.23	40.95	22.62	9.61	4.90
10	89.26	65.13	40.13	18.29	9.56
20	98.85	87.24	64.15	33.24	18.21
25	99.62	92.82	72.26	39.65	22.22
50	100	99.48	92.31	63.58	39.50
100	100	100	99.41	86.64	63.40

($N_T = 32$), 31 años (1975-2005) y ningún fenómeno excluido ($N = 31$). Los datos seleccionados se muestran en el cuadro 2.

La variable que se utiliza para la determinación de los periodos asociados con las alturas de olas extremas es la variable adimensional pendiente de la ola, que relaciona altura y periodo de la ola a través de la longitud de la ola (H/L).

En los cuadros se muestran los resultados obtenidos por el método de Goda del peralte de la ola, seleccionándose la distribución Weibull con parámetro $k = 2$, por presentar mejor coeficiente de correlación. En la figura 3 se muestra un gráfico que relaciona el periodo significativo y periodo de retorno, que junto con el H/L y periodo de retorno, constituyen herramientas para la determinación del periodo significativo y pendiente de la ola.

En el cuadro 6 se resumen los valores de peralte, altura de ola para un umbral de

cuatro metros, periodo de la ola y periodo de retorno.

Comparación entre los datos obtenidos en este estudio y los presentados por el Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Cuba

Este tópico se desarrolla con el objetivo de realizar una comparación sencilla entre resultados obtenidos por el Instituto de Meteorología de Cuba y los del presente trabajo. En la figura 3 se puede observar que de forma general los resultados obtenidos son mayores tanto para las alturas de ola como para el periodo de la ola; se considera que esto puede estar determinado por la aplicación del método de los picos o máximos que parte de la definición de un umbral, como se ha planteado anteriormente; de la muestra o serie de datos se eliminaron los valores por debajo del umbral

Cuadro 6. Valores de periodo de ola con el periodo de retorno, calculados por el método de Goda, con la información de las boyas del NOAA.

T_r (años)	H_s/L_p	H_s (m)	L_p (m)	T_p (seg.)	T_s (seg.)	L_s (m)	H_s/L_s
1	0.0217	3.57	164.45	10.27	9.76	148.41	0.024
2	0.0303	4.94	163.06	10.22	9.71	147.16	0.034
5	0.0358	6.75	188.70	11.00	10.45	170.30	0.040
10	0.0389	8.12	208.63	11.56	10.98	188.29	0.043
20	0.0416	9.49	227.98	12.09	11.49	205.75	0.046
25	0.0425	9.94	234.06	12.25	11.64	211.24	0.047
30	0.0431	10.30	238.97	12.38	11.76	215.67	0.048
40	0.0441	10.87	246.61	12.57	11.94	222.57	0.049
50	0.0448	11.31	252.46	12.72	12.08	227.85	0.050
60	0.0454	11.67	257.18	12.84	12.20	232.11	0.050
70	0.0458	11.97	261.14	12.94	12.29	235.68	0.051
75	0.0461	12.11	262.90	12.98	12.33	237.27	0.051
80	0.0463	12.24	264.54	13.02	12.37	238.75	0.051
90	0.0466	12.47	267.52	13.10	12.45	241.44	0.052
100	0.0469	12.68	270.17	13.16	12.50	243.83	0.052
125	0.0476	13.12	275.73	13.29	12.63	248.85	0.053
150	0.0481	13.48	280.23	13.40	12.73	252.91	0.053
175	0.0485	13.78	284.00	13.49	12.82	256.31	0.054
200	0.0489	14.05	287.24	13.57	12.89	259.24	0.054

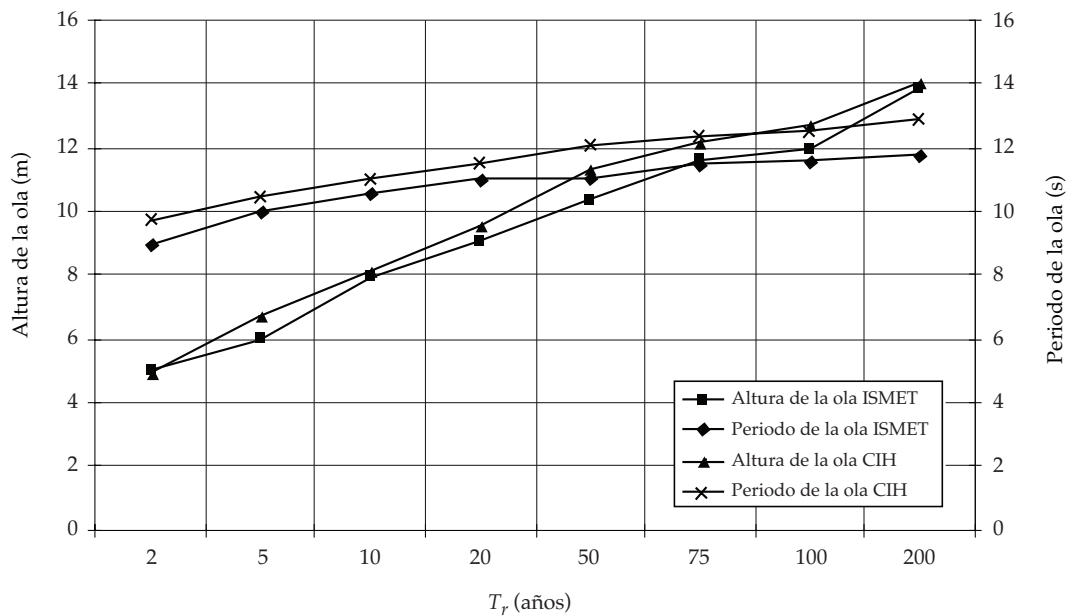


Figura 3. Alturas de la ola y periodos significativos de la ola calculadas por el ISMET y por el CIH para diferentes periodos de retorno.

seleccionado, lo que influye en los resultados estadísticos.

Recibido: 24/06/09
Aprobado: 05/09/10

Conclusiones

Se ha presentado un estudio estadístico de una serie de datos históricos obtenidos de tres boyas de la NOAA situadas en el Golfo de México, cercano a la región norte-occidental de la isla de Cuba, para la selección se realizó un análisis donde se conjugaron los efectos producidos en términos de inundación costera para el litoral norte de la ciudad de La Habana y los registros de estos instrumentos. Los resultados muestran un incremento de los valores de los parámetros estudiados para los diferentes periodos de retorno, lo que predice una mayor intensidad de las inundaciones en esta zona. Se brindan cuadros y figuras que vinculan la vida útil de la obra, el periodo de retorno del evento y la probabilidad de riesgo asociada, herramientas de gran utilidad para el diseño adecuado de futuras obras de defensas de costas.

Referencias

- BORGMAN, L.E. Risk Criteria. *J. Waterways & Harbors. Div. Proc. ASCE*. Vol. 89, No. WW3, 1963, pp. 1-35.
- GODA, Y. *On the Methodology of Selecting Design Wave Height*. 12th. Int. Coastal Engineering Conference, Málaga, Spain, 1988.
- GODA, Y. y KOBUNE, K. *Distribution Function Fitting for Store Wave Date*. 22th. Int. Coastal Engineering Conference, Delft, 1990.
- MITRANI-ARENAL, I. *et al. Las Penetraciones del Mar en las Costas de Cuba, las Zonas más Expuestas y su Sensibilidad al Cambio Climático*. Informe técnico. La Habana: IMSMET, 2000.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration's National Data Buoy Centre del Gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica [en línea]. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.ndbc.noaa.gov/hmd.shtml>.

Abstract

CÓRDOVA-LÓPEZ, L.F. & FONTOVA-DE LOS REYES, M. *Analysis of storm waves in deep waters in the northwestern region of Cuba. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 2, April-June, 2011, pp. 193-201.*

In order to design shore protection structures and to perform accurate risk studies, it is crucial to have good long term wave information to achieve appropriate designs from a functional point of view and save costs associated with defense structures and their maintenance. A statistical study, applying professor Goda's method (1988) to historical data taking the measurements from a series of buoys located in the region of the Gulf of Mexico, relating the meteorological events that have caused flooding in the northwestern coast of Cuba —mainly in Havana City— with the height of significant waves measured by these stations. As a result of this analysis, charts and graphics are presented that relate the return periods with extreme phenomena and the probability of their occurrence using international norms.

Keywords: waves, extreme waves, return period, probability, buoys.

Dirección institucional de los autores

Dr. Luis Fermín Córdova-López
M.C. Martha Fontova-de los Reyes

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Calle 114, número 11901, esquina 119 y 127
Marianao, CUBA
Teléfonos: +53 (7) 2601 416 y 2672 013
Fax: +53 (7) 2672 013
cordova@tesla.cujae.edu.cu
martha@cih.cujae.edu.cu