

Caracterización de las inundaciones costeras al sur de la provincia Las Tunas.



Characterization of coastal flooding in the south of Las Tunas province.

<https://cu-id.com/2377/v28n3e02>

 Wilber Diosdado Ramírez Espinosa^{1*},  Axel Hidalgo Mayo²,  Ida Mitrani Arenal³

¹Centro Meteorológico Provincial Las Tunas: C/ Lucas Ortiz Número 62, e/ Calixto Sarduy y Fernando Suárez. CP: 75100 Las Tunas Cuba.

²Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Cuba.

³Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología de Cuba, Loma de Casablanca, La Habana, Cuba.

RESUMEN: En trabajo se desarrolla la cronología de las inundaciones costeras en el litoral sur de la provincia las Tunas. El objetivo de la investigación es determinar las particularidades de las inundaciones costeras en el sur de Las Tunas generadas por ciclones tropicales, en el período 1932-2020. Dentro de los materiales y métodos que fueron utilizados se encuentran como fuentes de información, los archivos de reanálisis de la NOAA, los datos del NHC (National Hurricane Center), ambos disponibles en internet, datos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET) y del Centro Meteorológico Provincial de Las Tunas, así como testimonios locales obtenidos de entrevistas a los pobladores y reportes de prensa. Además, se empleó la distribución de Poisson y para determinar si la distribución de probabilidad escogida es idónea, se empleó la prueba no paramétrica de Pearson X^2 para variables discretas lo que permitió obtener los períodos de retorno de los ciclones tropicales para el área y de los eventos de inundación, donde se espera que un evento de inundación identificado de cierta importancia, ocurra al menos una vez cada 7.9 años. Los resultados obtenidos son aplicables en la elaboración de los pronósticos de inundaciones costeras en la zona, así como en los planes de contingencias y en acciones de manejo costero, por lo que se recomienda sea utilizado por las entidades responsables de estas actividades.

Palabras claves: inundaciones costeras, ciclones tropicales, períodos de retorno.

ABSTRACT: The thesis develops the chronology of coastal floods on the southern coast of the province of Las Tunas. The objective of the research is to determine the particularities of the coastal floods in the south of Las Tunas generated by tropical cyclones, in the period 1932-2020. Among the materials and methods used were, the NOAA reanalysis files, data from the NHC (National Hurricane Center), both available on the internet, data from the Cuban Institute of Meteorology (INSMET) and from the Provincial Meteorological Center of Las Tunas, as well as local testimonies obtained from interviews with residents and press reports. In addition, the Poisson distribution was used to determine if the chosen probability distribution is ideal, the non-parametric Pearson X^2 test was used for discrete variables, which allowed obtaining the return periods of tropical cyclones for the area and the flood, identified flood event of some significance is expected to occur at least once every 7.9 years. The results obtained are applicable in the elaboration of the forecasts of coastal floods in the area, as well as in the contingency plans and in coastal management actions, therefore it is recommended to be used by the entities responsible for these activities.

Keywords: coastal floods, tropical cyclones, return periods.

INTRODUCCIÓN

El estudio y conocimiento de eventos que caracterizan al clima marítimo, con énfasis en los fenómenos extremos que generan inundaciones costeras, es de vital importancia en el desarrollo de planes de contingencia, acciones de manejo costero y adaptación al cambio climático previsto.

La variabilidad y el cambio climático han incrementado la tendencia de los peligros naturales desde inicios del siglo XXI, destacándose las inundaciones costeras en los pequeños estados insulares, al paso de ciclones tropicales, los que se han visto afectados, además, por el retroceso de la línea costera producto del ascenso del nivel del mar a partir del calentamiento global actual (IPCC, 2015)

*Autor (es) para correspondencia: Wilber Diosdado Ramírez Espinosa. E-mail: wilber.ramirez@ltu.insmet.cu

Recibido: 08/04/2022

Aceptado: 24/06/2022

La costa es una región de extraordinaria importancia para el país, donde existen núcleos poblacionales de gran densidad y con tasas de crecimiento muy altas, con intensa actividad turística, industrial y marítimo - portuaria que generan una gran competencia entre la gestión económica y el funcionamiento de los ecosistemas. Es por ello que las medidas por posibles daños, debido a las implicaciones en el desarrollo a corto, mediano y largo plazos con inclusión del cambio climático previsto, son abordadas por los “Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución”.

Un paso importante en el camino de la integración del cambio climático en la política, planes y programas fue la aprobación el 25 de abril de 2017 por el Consejo de ministros, la Tarea Vida, conformado por 5 acciones estratégicas y 11 tareas. Respecto a los documentos elaborados anteriormente sobre este tema, la nueva propuesta, tiene un alcance y jerarquía superiores, los actualiza e incluye la dimensión territorial.

Relacionado con las inundaciones costeras en Cuba se han realizado muchas investigaciones donde se han abordado el estudio de estos eventos en varias regiones del país, las cuales se han incrementado notablemente desde la última década del siglo XX. Ejemplos como los de (Mitrani et al.,1994; Pérez, 1994; Moreno, 1998; Mitrani et al.,1999, 2000; Pérez et al., 2001; Hernández et al., 2002; Mitrani et al., 2012; Hidalgo & Mitrani, 2012, 2015; Mitrani et al., 2016; Hidalgo et al., 2016; Povea & Mitrani, 2016; Hidalgo et al., 2017; González et al., 2017; Mitrani et al., 2017; Córdova et al., 2018; Hidalgo et al., 2019). Sin embargo, los estudios de los regímenes extremos de viento e inundaciones a escala local en las regiones orientales del país, han sido menos estudiados y muchas de las publicaciones consultadas sobre este tema datan de los años '90 del siglo pasado (Salas et al., 1992; Salas & Mitrani, 1992; Mitrani et al.,1994, 1999; Pérez, 1994; Mitrani y Salas, 1998).

Por la ubicación geográfica de la provincia Las Tunas de modo general y la costa sur de manera particular, son zonas vulnerables a la afectación de los ciclones tropicales con fuertes vientos e inundaciones costeras, lo cual exige estar preparados ante la afectación de estos organismos. En la actualidad La provincia Las Tunas no cuenta con un estudio acabado, sobre la climatología de inundaciones costeras al sur del territorio, que permita una ejecución más eficaz de los planes de contingencia y acciones de manejo costero, así como en la planificación de estrategias que tributen a mitigar los efectos del cambio climático, particularmente el ascenso del nivel del mar, sobre esta costa del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

- **Zona de Batimetría:** Se empleó La cuadrícula GEBCO-2020. Esta región presenta las coordenadas de puntos con datos batimétricos reales y comprende desde los 19.0042° hasta 23.9958° de latitud norte, y los -4.0042° hasta -86.9958° de longitud oeste, [figura. 1](#)

El principal asentamiento costero al sur de Las Tunas es el poblado pesquero de Guayabal, ubicado a 20 km del municipio Amancio, a los 20.7°N y -77, 6°W, [figura 2](#). En litoral sur de las Tunas, la actividad económica fundamental es la pesca, destacándose fundamentalmente la captura y procesamiento de los productos extraídos del mar. También se encuentra la exportación de azúcar a granel y otros derivados de la caña de azúcar.

- Se utilizaron como fuentes de información los trabajos de [Moreno et al., 1998](#); [Pérez et al., 2001](#); [Portela, 2004](#); [Hidalgo et al., 2015](#). Se utilizó la información del archivo del Instituto de Meteorología (INSMET) y del Centro Meteorológico Provincial(CMP), resúmenes mensuales y de ciclones

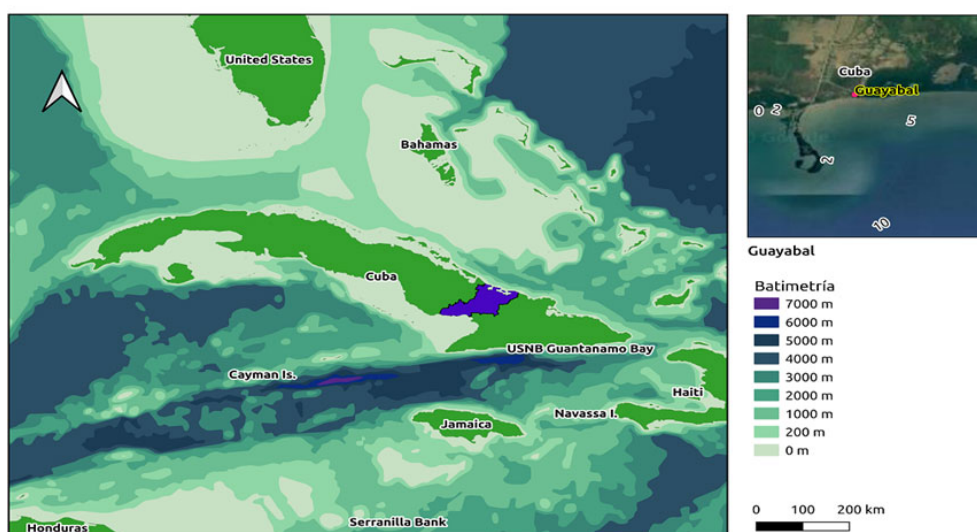


Figura 1. Zona de batimetría

tropicales, mapas sinópticos y los de trayectoria de ciclones tropicales así como los mapas de trayectoria de huracanes que están disponibles en el sitio web http://www.nhc.noaa.gov/data/#tracks_all del National Hurricane Center, además se utilizaron los reanálisis atmosféricos NCEP/NCAR de la NOAA y la base de datos sobre ciclones tropicales (HURDAT 2.0) del Centro Nacional de Huracanes.

- Se entrevistó a pobladores de la zona y los testimonios recogidos en encuestas, prensa escrita, digital y artículos en Internet fueron comparados con los datos de los archivos del INSMET y el CMP.
- Para confeccionar la cronología de inundaciones costeras se consultaron varias bibliografías sobre ciclones tropicales que han afectado a Cuba, entre las que podemos citar: Arellano, 1980; Ramos, 2009; Puig et al., 2010.
- Se utilizó la cronología elaborada por Ramírez, et al (2017) que abarca el período (1932-2017).
- Se utilizó el software de tipo información geográfica Qgis 2.18, para la obtención de la batimetría de la zona de estudio, la profundidad media sobre el *fetch*, apoyado en la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO-2020) y las trayectorias de los huracanes próximos a la zona de estudio.
- Derrotero de las Costas de Cuba. Región Marítima del Sur. De Cabo Cruz hasta Punta María Aguilar”. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba. 2004.
- La tabla de Marea de las Costas de Cuba. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba. 2020.
- Herramienta de Excel para la obtención de tablas y cálculos, que muestran el comportamiento y los períodos de retorno de las inundaciones costeras.

- Informe de peligro de fenómenos meteorológicos extremos, zona sur municipio Amancio. Centro Meteorológico Provincial Las Tunas. CITMA. 2013.

MÉTODOS EMPLEADOS

Para la actualización y ampliación de la cronología de inundaciones costeras de la zona de estudio desde 1851 hasta 2020, se empleó el método de selección de análogos, a partir de 1851 ya que no se cuenta con testimonios en el período (1851-1931).

Cálculo de los períodos de retorno

El cálculo de los períodos de retorno para el área de estudio se realizó para los ciclones tropicales.

Se realizó una delimitación de los mares adyacentes a Cuba entre los (18-24 °N y 74-85 °W) la cual delimita todo el territorio nacional. Luego se hizo una circunferencia con un radio de 180 km (1.6°), que es el límite de influencia para que los ciclones tropicales generen inundaciones costeras de cierta importancia en el área de estudio, figura 3.

Se empleó la expresión 1, para el cálculo de la función de retorno: el valor de la frecuencia está dado en casos por año.

$$F_n = \frac{n}{N} \cdot \frac{m}{M} \quad (1)$$

Dónde:

F_n - Frecuencia de ocurrencia según la intensidad del ciclón tropical.

n - Cantidad de casos en la circunferencia de centro 20.7° N y 77.6° W y radio 180 km.

N - Cantidad de casos en el área (18-24° N y 74-85° W).

m - Casos según el tipo de intensidad determinados por la velocidad del viento.

M : Cantidad de años en la serie.



Figura 2. Fragmento de imagen satelital descargada del SAS Planet del principal asentamiento costero del sur de Las Tunas.



Figura 3. Área seleccionadas para el cálculo de los períodos de retorno

Mediante el programa Curve Expert (Daniel Hyams, 2017, versión 2.6.5), se graficó la función de retorno con respecto a la velocidad del viento máximo. Para calcular el período de retorno de la velocidad de viento esperada en el área de estudio se realizó de forma inversa.

Cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por wind setup

En el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por *wind setup* se emplearon las formulaciones descritas en el (SPM, 1984) 2 y 3

$$\Delta\xi = \frac{kv_{10}^2 \Delta x \cos\alpha}{g[H + \xi]} \quad (2)$$

$$K = \frac{\rho_a}{\rho_\omega} \cdot C_d \quad (3)$$

En la ecuación 2:

$\Delta\xi$ = sobreelevación del nivel del mar por *wind set up*

v_{10} = Velocidad del viento a 10 m (nivel del anemómetro)

x = coordenada espacial α (se recomienda la disorientada hacia la costa, tancia hasta la isobata de en el ángulo) 20 m)

g = aceleración de gravedad (m)

ρ_a, ρ_ω = densidad del aire y del agua respectivamente

C_d = Coeficiente de intercambio turbulento de impulso para el aire

α = Ángulo entre la dirección del viento y la línea perpendicular a la línea costera

H = Profundidad del mar en condiciones no perturbadas.

Períodos de retorno de las inundaciones costeras

En el caso del período de retorno de las inundaciones costeras se empleó la distribución de Poisson, para la cual debe cumplirse que la frecuencia observada sea inferior a 0.1 y el tamaño de la muestra superior a 50 (Goda, 2000; Coles, 2001; Wilks, 2011). La expresión matemática de esta función es:

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!!} \quad (4)$$

Donde:

$P(x)$: Probabilidad de ocurrencia del evento n-ésimo.

λ : Promedio del número de eventos por años.

x : Número de eventos en el período de observación.

El período de retorno se calculó para todos los eventos de inundación, ya que en la zona de estudio, la línea costera y la primera línea de costa, donde se ubican alrededor de 100 viviendas, solo están separada una distancia entre 30 y 40 metros, por lo que aunque la inundación sea ligera (0-250 m) afectaría a parte de la población. Para ello se empleó la serie 1932-2020, que fue la obtenida a partir de testimonios y datos más confiables, figura 4.

Para determinar si la distribución de probabilidad escogida es idónea, se empleó la prueba no paramétrica de Pearson χ^2 , a partir de la expresión 5:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{0i} - F_{ei})^2}{F_{ei}} = \sum_{i=1}^k \frac{(F_{0i} - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} \quad (5)$$

Donde:

i Clase ($i = 1, 2, \dots, k$).

k : Cantidad de clases.

F_{0i} : Frecuencia observada de la clase i .

F_{ei}, P_i : Frecuencia estimada y probabilidad estimada de la clase i respectivamente.

n : Tamaño de la muestra.

Sí $\chi^2 > \chi_{1-\alpha}^2(k - m - 1)$; (distribución χ^2 con $m-k-1$ grados de libertad y un nivel de significación α se rechaza la hipótesis nula, o sea que la distribución escogida no es adecuada.

Aunque la prueba Pearson χ^2 tiene limitaciones para cuando la frecuencia observada es menor que cinco y hay pocas clases, autores como (Cochran, 1954; Dickinson & Chakraborti, 2003; Dowdy *et al.*, 2004) recomiendan su uso siempre y cuando la frecuencia esperada sea mayor a 1.

Matemáticamente el período de retorno según (USACE, 2006) se calcula por la expresión 6:



Figura 4. Foto donde se ilustra la distancia de la línea costera a la primera línea de viviendas.

$$T_r = \frac{1}{1 - P_a} \quad (6)$$

Donde:

T_r : Período de retorno en años.

P_a : Probabilidad acumulada.

Tendencia estadística de los eventos de inundación

Para probar el posible incremento o disminución de los eventos de inundación se aplicó la prueba de hipótesis de la proporción a partir de la [expresión 7](#)

$$Z = \frac{x - np_0}{\sqrt{np_0(1 - p_0)}} \quad (7)$$

Donde:

p, p_0 - Proporciones de los períodos de prueba y de referencia respectivamente.

x, n - Cantidad de eventos y tamaño de la muestra del período de prueba respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Confección de una cronología más detallada

En la [tabla-1](#) se recogen por orden cronológico los ciclones tropicales que provocaron los eventos de inundaciones costeras e el área de estudio y su clasificación (los primeros 11 eventos corresponden a los análogos identificados).

Se determinaron los casos de las trayectorias de ciclones tropicales más comunes que favorecen las inundaciones costeras en el área de estudio.

1. Trayectoria paralela a la costa norte de la provincia Camagüey (Huracán mayor).
2. Trayectoria cruzando sobre las provincias desde Holguín hasta Ciego Ávila de NE a SW.
3. Trayectoria paralela a la costa sur de Cuba.
4. Trayectoria cruzando Cuba de Sur a Norte sobre las provincias desde Granma hasta Ciego de Ávila.

Cálculo de la función de retorno para ciclones tropicales.

Para realizar el ajuste de la función de retorno para ciclones tropicales en el área de estudio se utilizó el software estadístico *Curve Expert 2017*, versión 2.6.5), siendo el ajuste de *Weibull* el de mejores resultados como se muestra en la [tabla 3](#) y [figura 5](#):

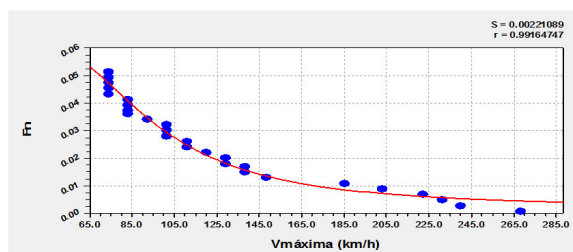


Figura 5. Ajuste de *Weibull* para la función de retorno de afectación de Ciclones Tropicales en la costa sur de Las Tunas en el período comprendido desde 1919 hasta el 2020.

La [tabla 4](#) muestra los períodos de retorno de afectación de ciclones tropicales al área de estudio para

Tabla 1. Cronología de Inundaciones costeras 1851-2020 en el sur de la provincia Las Tunas.

NO.	Fecha de ocurrencia	Situación Meteorológica	Clasificación
1	20/agosto/1851	huracán #4 o de La Florida	Moderada
2	13/septiembre/1875	huracán de #3	Ligera
3	15/septiembre/1876	huracán de #2 o San Narciso	Ligera
4	19/agosto/1880	huracán de #3	Moderada
5	16-17/agosto/1886	huracán de #6	Fuerte
6	19/mayo/1887	Tormenta tropical #2	Ligera
7	3-4/septiembre/1888	huracán de Faquineto	Ligera
8	23/septiembre/1894	huracán #4	Ligera
9	24/agosto/1909	huracán #6	Moderada
10	13/agosto/1915	huracán Galveston	Ligera
11	24/agosto/1917	huracán de Pinar del Río	Ligera
12	9/nov./1932	huracán del 32	Fuerte
13	2/septiembre/1958	huracán Ella	Ligera
14	8/oct./1963	huracán Flora	Fuerte
15	1ro/oct./1966	huracán Inés	Ligera
16	6/junio/1980	huracán Allen	Ligera
17	18-19/nov./1985	huracán Kate	Ligera
18	14/sept./1988	huracán Gilbert	Ligera
19	8-9/jul./2005	huracán Dennis	Ligera
20	7-8/Sep./2008	huracán Ike	Ligera
21	8/nov./2008	huracán Paloma	Fuerte
22	9/sep/2017	huracán Irma	Ligera
23	24/agosto/2020	tormenta tropical Laura	Ligera

Tabla 2. Ciclones tropicales que afectaron el área de estudio.

Mares adyacentes a Cuba entre los (18-24 °N y 74-85 °W)	Área de estudio radio de 180km (1.6°)
211	40

las Tormentas Tropicales y los huracanes teniendo en cuenta las cinco categorías de la escala Saffir- Simpson.

Para calcular el período de retorno de la velocidad de viento esperada en el área de estudio se realizó de forma inversa, al modelo de Weibull se le introdujeron los valores de frecuencia de casos por años y luego se calculó la velocidad del viento esperada para ese intervalo de tiempo, tabla 5.

Períodos de retorno de las inundaciones costeras.

La tabla 6 muestra los resultados de los cálculos, donde se cuenta la variable aleatoria x que computa el número de eventos de inundaciones costeras ($\lambda = 0.135$) por año, para el período 1932-2020.

$$P(f) = e^{-0.135} \times 0.135^f / f!, \text{ para } f = 0,1$$

$$X^2 = 0,0989$$

Tendencia estadística de los eventos de inundación.

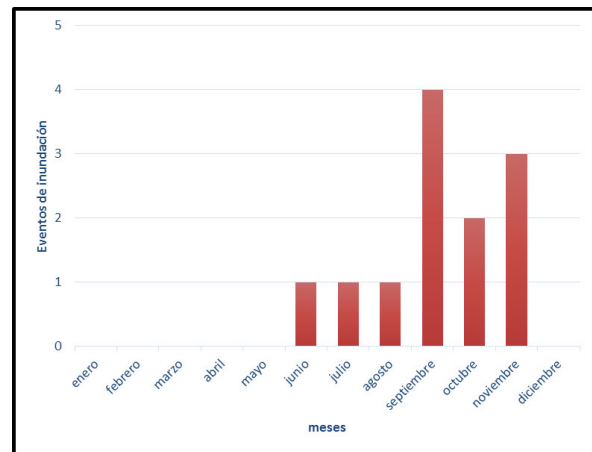


Figura 6. Casos de inundaciones por meses (1932-2020).

Tabla 3. Características principales del modelo de Weibull

Modelo de Weibull	Coefficientes
$y = a - be^{-cx^d}$	a=5.90069850585E-002
	b=5.69625192387E-002
	c=2.13925344556E+005
	d -2.75343992009E+000
Error estándar	S =0.00221089
Coefficiente de correlación	r=0.99164747

Tabla 4. Período de retorno de ciclones tropicales.

Escala Saffir- Simpson	Período de retorno (Casos/ años)	Velocidad del viento (km/h)
tormenta tropical	1/18,5	65
Huracán Categoría (C1)	1/45,5	119
Huracán Categoría (C2)	1/76,9	154
Huracán Categoría (C3)	1/90,9	178
Huracán Categoría (C4)	1/142,8	210
Huracán Categoría (C5)	1/1000	>252

Tabla 5. Período de retorno de la velocidad del viento esperada.

Período de retorno (Casos/ años)	Velocidad del viento esperada (km/h)
1/10	-
1/20	69
1/25	83,5
1/50	122,7
1/100	171,6

Tabla 6. Período de retorno de las inundaciones costeras.

K(clase)	Fo	Pe	Fe	Pa	Tr
0 IC/año	77	0,8739	77,7738	0,8739	-----
1 IC/año	12	0,1178	10,4864	0,9917	7,9

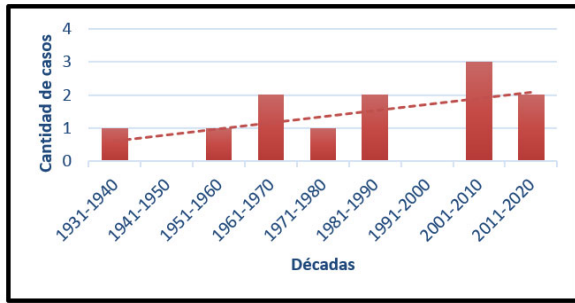


Figura 7. Comportamiento por décadas de los eventos de inundación costera en el período 1932-2020.

Cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por wind setup.

En la figura 8 se muestra el perfil de profundidad desde la isobata de 20 m hasta la costa, donde se obtiene como profundidad media 13 m.

En la figura 9 se muestra el perfil de elevación, desde la costa hasta aproximadamente 1 km tierra

adentro, donde se observa que la cota mínima de inundación es de 0,6 m y la máxima de 6 m.

En la tabla 8 se presentan los resultados de los cálculos realizados de la sobreelevación del mar por *wind setup*, para velocidades del viento de 25 m/s (fuerza de tormenta tropical de 90 km/h), a partir del cual se ha demostrado en la práctica que comienzan a ocurrir inundaciones ligeras en el área de estudio (alcance horizontal del agua tierra adentro entre 0 y 250 m).

Además de las magnitudes que se muestran en la tabla anterior se utilizaron los siguientes valores para los cálculos.

- $g=9.8 \text{ m/s}^2$
- ρ_w de mar=1027 kg/m³
- $\rho_a \approx 1.1737 \text{ kg/m}^3$
- Profundidad media del golfo de Guacanayabo $\approx 13 \text{ m}$.
- Distancia aproximada entre la isobata de 20 m y la línea costera $\approx 70 \text{ km}$.

Tabla 7. Comportamiento por décadas de los eventos de inundación costera para la costa sur de Las Tunas en el período 1932-2020.

#	DÉCADA	CASOS	MES	AÑO	Ciclón Tropical	Tipo	TRAYECTORIA
1	1931-1940	1	Nov	1932	h del 32	Fuerte	Perpendicular a la línea costera(S a N)
2	1941-1950	0	--	--	--	--	--
3	1951-1960	1	Sept	1958	h Ella	Ligera	Paralela a la CS
4	1961-1970	2	Oct Oct	1963 1966	h Flora h Inés	Fuerte Ligera	Cruzando: NE a SW Paralela a la CS
5	1971-1980	1	Jun	1980	h Allen	Ligera	Paralela a la CS
6	1981-1990	2	Nov sept	1985 1988	h Kate h Gilbert	Ligera Ligera	Paralela a la CN Paralela a la CS
7	1991-2000	0	--	--	--	--	--
8	2001-2010	3	Jul sept nov	2005 2008 2008	h Denis h Ike h Paloma	Ligera Ligera Fuerte	Paralela a la CS Cruzando: NE a SW Perpendicular a la línea costera(S a N)
9	2011-2020	2	sept agost	2017 2020	h Irma tt Laura	Ligera Ligera	Paralela a la CN Paralela a la CS

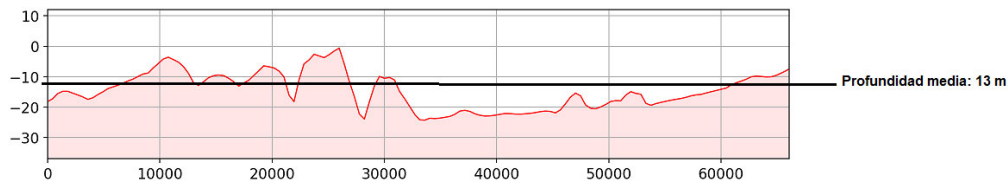


Figura 8. Perfil de profundidad desde la isobata de 20 m hasta la costa (Obtenida a partir del SIG Qgis 2.18, empleando la cuadrícula GEBCO 2020).

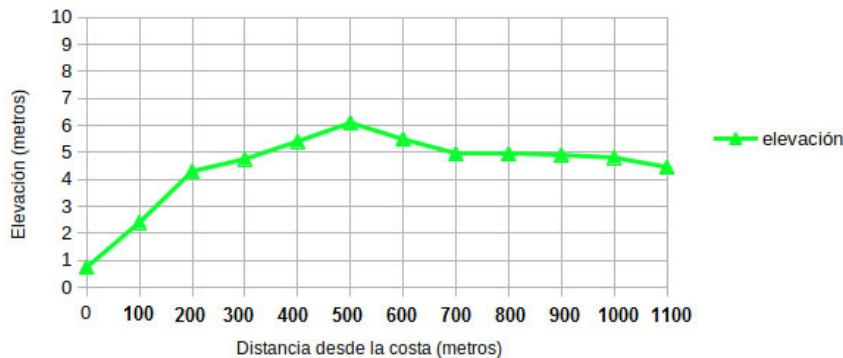


Figura 9. Perfil elevación.

Tabla 8. Cálculo de la sobreelevación del nivel del mar por *wind setup*.

U_{10}	Δx	θ	$\rho a/\rho w$	C_d	U^2_{10}	$\cos\theta$	d	Δz_p	Δz
25	50000	0	0,001143	0,00308	625	1	12	0,94	
25	40000	0	0,001143	0,00308	625	1	7,8	1,03	
25	30000	0	0,001143	0,00308	625	1	17,8	0,36	
25	20000	0	0,001143	0,00308	625	1	15,8	0,28	
25	10000	0	0,001143	0,00308	625	1	17,2	0,13	
25	200	0	0,001143	0,00308	625	1	9,4	0,00	0,77

CONCLUSIONES

- De los 12 eventos de inundación identificados, 3 se clasificaron como fuertes y 9 ligeras. Los meses más peligrosos para la ocurrencia de estos eventos fueron: septiembre con 4 casos, seguido por los meses de noviembre 3 casos y octubre 2 casos.
- La trayectoria más peligrosa es cuando el ciclón tropical cruza de Sur a Norte, entre las provincias desde Camagüey hasta Ciego de Ávila (perpendicular a la costa). La trayectoria más frecuente sin embargo es cuando el ciclón tropical se mueve paralelo a la línea de costa de Este a Oeste, con 6 afectaciones.
- Se espera que un evento de inundación identificado de cierta importancia, ocurra al menos una vez cada 7.9 años.
- De las inundaciones identificadas, las más frecuentes ocurren por *wind setup*, unido a la marea astronómica, a partir de una velocidad del viento entre 80 y 90 km/h, ya que la cota de inundación mínima en el área de estudio está entre 0,5 y 0,7 m, alcanzando una distancia tierra adentro entre 40 y 70 m. La cota máxima de inundación en la zona es de aproximadamente entre 5-6 m, lo cual provoca que alturas de las olas entre 3 y 5 m, el mar avance tierra adentro hasta 800 m (huracán del 32 y huracán Paloma).

REFERENCIAS

- Caires, S., Swail, V. R., & Wang, X. L. (2006). Projection and Analysis of Extreme Wave Climate. *Journal of Climate*, 19(21), 5581-5605.
- Rueda, A., Losada, I. J., & Medina, R. (2014). A weather-type statistical downscaling. Framework for ocean wave climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 1-17.
- Casals, R. (2002). Cronología de las inundaciones costeras ocurridas en el sur de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1), 90-95.
- Casals, R. (2004). Los procesos de transformación del oleaje e incrementos del nivel medio del mar en Cayo Largo del Sur, Archipiélago de los Canarreos. *Revista Cubana de Meteorología*, 11(2), 74-84.
- Casals, T., Osorio, P., & Fernández, L. (2016). Análisis de las inundaciones costeras ocurridas en áreas protegidas de Cuba durante el periodo 1981-2010. *Revista Cubana de Meteorología*, 22(2), 199-215.
- Coles, S. 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. (ser. Springer Series in Statistics), London: Springer-Verlag London.
- Dickinson, J. & Chakraborti, S. (2003). Nonparametric Statistical Inference. (ser. Statistics: Textbooks and Monographs, no. ser. 168), Fourth Edition ed., New York: Marcel Dekker, Inc., 645 p., ISBN: 0-8247-4052-1.
- Dowdy, S.; Wearden, S. & Chilko, D. (2004). Statistics for Research. (ser. Wiley Series in Probability and Statistics), Third Edition ed., New Jersey: John Wiley&Sons, 627 p.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. (Ser. Advances Series on Ocean Engineering), Second Edition ed., vol.15, New Jersey-London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 443 p., ISBN: 981-02-3256-X.
- GEBCO (2020). General Bathymetric Chart of the Oceans, Digital Atlas, Centenary Edition of the IHO/IOC, Natural Environment Research Council/British Oceanographic Data Center, Updated march
- GEOCUBA (2003). Derrotero de las costas de Cuba. La Habana: Agencia de Cartografía Náutica.
- Guedes, C., & Carvalho, A. N. (2012). Probability distributions of wave heights and periods in combined sea-states measured off the Spanish coast. *Ocean Engineering*, 52,13-21.
- Guerra, C.; Menéndez, E.; Barrero, R. & Egaña, E. (2006). Estadística. Segunda Edición ed., La Habana: Editorial Félix Varela, 376 p., ISBN: 959-258-776-0.
- Hernández, I y García, E. (2011). Inundaciones en la Ciudad de La Habana por sistemas frontales y su relación con el ENOS. Influencia en la costa. La Habana: Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología (SOMETCUBA-2011). ISBN: 978-959-7167-20-4.
- Hidalgo, A. (2016). Metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba. Tesis de Maestría. La Habana: Instituto de Ciencias y tecnologías Aplicadas e Instituto de Meteorología, 73p.

- Hidalgo, A. y Mitrani, I. (2012). Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara- Playa Guardalavaca. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2), 152-163.
- Hidalgo, A., y Mitrani, I. (2015). Tendencias climáticas de las inundaciones costeras en el litoral Gibara-Playa Guardalavaca, provincia Holguín, Cuba. *Revista de Climatología*, 15, 93-102.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I.; Pérez, G.; Hernández, N.; Córdova, O., L.; Regueira, V.; Ramírez, W.;González, C. M.; Machado, A.; Perigó, E.; Lorenzo, L.; Agüero, K.; Vinajera, V.; Jiménez, J.; Boligán, M.; Sánchez, L.; Victorero, A.; Mursulí, A.; García, L.; Ortega, F. E.; Castellanos, M. J.; Araujo, L. A.; Báez, E.; Laborde, N. & Casals, R. (2016). Cronología de las inundaciones costeras por penetración del mar para el archipiélago cubano. Resultado Científico, Holguín: CMP Holguín, Instituto de Meteorología, p. 40.
- Hidalgo, A., Mitrani, I., y Rivas, G. (2017). Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2), 209-216.
- Hidalgo, A., Hernández, N., y Perigó, E. (2019). Períodos de retorno para las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento y oleaje en la costa nororiental de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2).
- Hidalgo, A., Mitrani, I., Ramírez, W., Pérez, Y., Córdova, O & de Oca, A. M. (2020). Metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba. Aplicación en la costa norte de la región central y oriental. *Revista Cubana de Meteorología*, 26(2).
- INSMET (2012). Atlas Climático de Cuba. La Habana: Instituto de Meteorología.
- INSMET (2015). Manual de Procedimiento Operativo Centro de Meteorología Marina. La Habana: Instituto de Meteorología.
- INSMET (2012). Atlas Climático de Cuba. La Habana: Grupo Empresarial Geocuba.
- INSMET (2018). Glosario de términos meteorológicos del Sistema Nacional de Pronóstico. Instituto de Meteorología.
- Landsea, C.; J. Franklin & J. Beven (2014). The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). April 2014. The National Hurricane Center (NHC), Miami, Florida, USA.
- Lemenkova, P. (2020). GEBCO Gridded Bathymetric Datasets for Mapping Japan Trench Geomorphology by Means of GMT Scripting Toolset. *Geodesy and Cartography*, 46(3), 98-112.
- Mazas, F., Kergadallan, X., Garat, P., & Hamm, L. (2014). Applying POT methods to the Revised Joint Probability Method for determining extreme sea levels. *Coastal Engineering*, 91, 140-150.
- Méndez, F. J., Menéndez, M., Luceño, A., & Losada, I. J. (2007). Analyzing Monthly Extreme Sea Levels with a Time-Dependent GEV Mode. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 24(5), 894-911.
- Mitrani, I. y Pérez, R. (1998). Influencia de los ciclones tropicales en el régimen de oleajes peligrosos del litoral habanero. *Memorias de la Conferencia Científica sobre Ciclones Tropicales "Rodríguez Ramírez"* in Memoriam, 138-144.
- Mitrani, I. (2006). Las inundaciones costeras en Cuba y su repercusión social". *Revista Cubana de Bioética*, Fundación Juan Pablo II, La Habana, septiembre del 2006, 4:11
- Mitrani, I. (2014). *Meteorología Marina*. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(1), 76-77.
- Mitrani, I., Díaz, O. O., Vichot, A., Hernández, I., Hidalgo, A., García, E. y Rodríguez, J. A. (2012). Tendencias climáticas de las inundaciones costeras severas en áreas de Cuba. *Revista Ciencias de la Tierra y Del Espacio*, 13(2), 68-84.113- 138.
- Mitrani, I., Pérez, R., García, O., Salas, I., Juantorena, J., Ballester, M., Beauballet, P., Pérez, A. L. y Rodríguez, C. (2000). Las zonas más expuestas a las inundaciones costeras en el territorio cubano y su sensibilidad al posible incremento del nivel medio del mar por cambio climático. *Revista Cubana de Meteorología*, 7(1), 45-50.
- Mitrani, I., Pérez, R., García, O., Salas, I., Juantorena, Y., Ballester, M. y Beauballet, P. 2001. "The coastal floods in the Cuban territory, the most sensitive areas and the possible impact of the climate change" Proceeding of the (2001). Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, Río de Janeiro, Brasil, 6-8 octubre 2001.
- Mitrani, I., Hidalgo, A., Cabrales, J., & Vichot, A. (2019) The coastal flood regime and its climate tendencies at the Havana City shore area, RCM, vol 25, No 3, septiembre-diciembre.
- Montoro, P. y Díaz, O. (2012). Propuesta de un modelo dinámico para el pronóstico de surgencia de huracanes en las costas de Cuba (MODSUR). *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2), 164-177
- Montoya, R.; Menéndez, M. & Osorio, A. (2018). "Exploring changes in Caribbean hurricane-induced wave heights". *Ocean Engineering*, 163: 126-135, DOI: [10.1016/j.oceaneng.2018.05.032](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.032).
- Moreno, A. (ed.). (1998). Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las inundaciones costeras, Prevención y Reducción de Acción Destructiva. Informe Final del Proyecto Cuba 94/003, La Habana: Instituto de Meteorología, 172 p.
- Muraleedharan, G., Lucas, C., Martins, D., Guedes, C., & Kurup, P. G. (2015). On the distribution of significant wave height and associated peak periods. *Coastal Engineering*, 103, 42-51.
- OMM (2015). Directrices de la OMM sobre servicios de predicción y aviso multirriesgos que tienen en cuenta los impactos. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.

- Pérez R., Salas, I. y J. Dole (2003). Modelo Numérico para pronosticar la surgencia que provocan los huracanes en las costas de Cuba (MONSAC3). *Revista Cubana de Meteorología*, 10(2), 66-70.
- Pérez, P. J., Casals, R., Díaz, L., del Sol, A. y Vega, R. (1994). Análisis hidrometeorológico y estadístico de las penetraciones del mar ocurridas en el Malecón Habanero. Instituto de Meteorología. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Informe Final de Resultado. La Habana: Instituto de Meteorología, 55 pp., 25 figuras.
- Pérez, R. (2013). Cronología de los Huracanes de Cuba. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencias, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba. 7 pp.
- Pérez, R., Salas, I. y Dole, J. (2005). Proyecto de Investigación 01309168 (Informe parcial) "Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios
- Pérez, R., Salas, I., Samper, S. y Dole, J (2009). Atlas Digital de Surgencia provocadas por los Ciclones Tropicales en el Archipiélago Cubano. CD-ROM. La Habana: Instituto de Meteorología. Playa Guardalavaca. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2), 152-163.
- Puig, M. A., Betancourt, J. E., & Álvarez, R. (2010). Fortalezas frente a Huracanes (1959-2008). La Habana: Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil de Cuba.
- Ramírez, W., Pérez, Y., y Estrada, E. (2017). Procedimiento para la estimación del estado de la superficie marina y cronología de inundaciones costeras en Guayabal y Cascarero. *Revista Electrónica de Innovación Tecnológica*, 23(3).
- Ramos, L. (2009). Huracanes. Desastres Naturales en Cuba. La Habana: Editorial Academia.
- Salas, I. y Mitrani, I. (1992). Elementos de las olas de viento en un ciclón tropical. *Revista Cubana de Meteorología*, 5(2), 40-44.
- Salas, I., Moreno, A., Mitrani, I. y Lezcano, J. (1992). Oleaje máximo y régimen hidroclimático de la costa sur de la región oriental. *Revista Cubana de Meteorología*, 5(1), 12-16.
- Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., & Sterl, A. (2011). A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. *Journal of Climate*, 24(5), 1461-1479.
- Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba (2020). Tablas de Mareas de las costas de Cuba. La Habana: Edimar.
- Thevasiyani, T. & Perera, K. (2014). Statistical analysis of extreme ocean waves in Galle, USACE (1984). Shore Protection Manual (Volume I). Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- Vinoth, J. & Young, I. R. (2011). Global Estimates of Extreme Wind Speed and Wave Height. *Journal of Climate*, 24(6): 1647-1665, DOI: [10.1175/2010JCLI3680.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3680.1).
- Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences. Third Edition ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier/Academic Press.
- Zotov G. V. (1977). Cálculo del régimen de ola y señalización de los planos de inundación en la región de la CEN, Cienfuegos, Cuba (En ruso), Soyuzmorniproject, 210 pag.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Wilber Diosdado Ramírez Espinosa: **Análisis formal, conceptualización, conservación de datos, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición, investigación, metodología, validación y visualización.** Axel Hidalgo Mayo: **Análisis formal, conceptualización, conservación de datos, redacción - revisión y edición, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación y visualización.** Ida Mitrani Arenal: **Análisis formal, conceptualización, conservación de datos, redacción - revisión y edición, investigación, metodología, recursos, supervisión, validación y visualización.**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)