

# Metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba. Aplicación en la costa norte de la región central y oriental

## Methodology for climatic study of the coastal flooding in Cuba. Application in the north coast of central and East region



<http://opn.to/a/N1jif>

Axel Hidalgo-Mayo <sup>1\*</sup>, Ida Mitrani-Arenal <sup>2</sup>, Wilber Ramírez-Espinos <sup>3</sup>, Yadira Pérez-Calzada <sup>3</sup>, Orlando Lázaro Córdova-García <sup>4</sup>, Amaury Machado-Montes de Oca <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Centro Meteorológico Provincial de Holguín, Holguín, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba

<sup>3</sup>Centro Meteorológico Provincial de Las Tunas, Las Tunas, Cuba.

<sup>4</sup>Centro Meteorológico Provincial de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila, Cuba.

<sup>5</sup>Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Villa Clara, Cuba.

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología que estructure los estudios climáticos de inundaciones costeras en el archipiélago cubano, a partir de las fuentes de información disponibles en Cuba y de métodos estadísticos actualizados empleados por parte de la comunidad científica internacional. Los métodos empleados fueron los tests no paramétricos de Spearman, Mann- Kendall y Pettitt, las distribuciones de Poisson y Gumbel, así como las pruebas de bondad de ajuste  $\chi^2$  y Kolmogorov- Smirnov. Como fuentes de información se utilizaron las estaciones meteorológicas costeras cubanas, así como los archivos del Instituto de Meteorología y del Centro Nacional de Huracanes. Como resultados se obtuvo el período de retorno de la velocidad máxima del viento, para las probabilidades del 10%, 4% y 2%, y de las inundaciones moderadas y fuertes, así como la tendencia estadística del viento máximo anual y de las inundaciones costeras. Se concluye que la metodología propuesta está sustentada en el estado actual del conocimiento a nivel internacional sobre esta temática, mientras que se corresponde con las fuentes de información y los datos meteorológicos disponibles en Cuba. Los métodos empleados y los resultados obtenidos en esta investigación son válidos para la ejecución de futuras investigaciones de este tipo, así como su aplicación en los planes de reducción de desastres y las políticas de adaptación al cambio climático que ejecuta el Estado Cubano en el marco de la "Tarea Vida".

**Palabras clave:** Inundaciones costeras, períodos de retorno, tendencia estadística, cambio climático, Tarea Vida.

**ABSTRACT:** This paper aims to develop a methodology that structures the climatic studies of coastal flooding in the Cuban archipelago, based on the sources of information available in Cuba and updated statistical methods used by the international scientific community. The methods used were the non-parametric tests of Spearman, Mann-Kendall and Pettitt, the distributions of Poisson and Gumbel, as well as the tests of goodness of fit  $\chi^2$  and Kolmogorov-Smirnov. Cuban coastal weather stations were used as sources of information, as well as the archives of the Institute of Meteorology and the National Hurricane Center. As a result, the period of return of the maximum wind speed was obtained, for the probabilities of 10%, 4% and 2%, and of moderate and strong floods, as well as the statistical trend of the maximum annual wind and coastal flooding. It is concluded that the proposed methodology is based on the current state of international knowledge on this subject, while it corresponds to the sources of information and meteorological data available in Cuba. The methods used and the results obtained in this research are valid for the development of future investigations of this type, as well as their application in the disaster reduction plans and climate change adaptation policies that the Cuban State develops within the framework of the "Life Task".

**Key words:** Coastal flooding, return period, statistical trends, climate change, Life Task.

\*Autor para correspondencia: Axel Hidalgo-Mayo. E-mail: [axel.hidalgo@hlg.insmet.cu](mailto:axel.hidalgo@hlg.insmet.cu)

Recibido: 27/11/2019

Aceptado: 20/01/2020

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad y el cambio climático han incrementado la tendencia de los peligros naturales desde inicios del siglo XXI. Una de las principales amenazas para los asentamientos costeros humanos es el incremento de los eventos de inundación costera (Toimil *et al.*, 2016), los cuales se han incrementado desde inicios del siglo XXI en los pequeños estados insulares, producto de la variabilidad y el cambio climático, fundamentalmente al paso de ciclones tropicales, los que se han visto afectados, además, por el retroceso de la línea costera a raíz del ascenso del nivel del mar a partir del calentamiento global actual (Stocker *et al.*, 2013).

A nivel internacional existen varias investigaciones que abordan el uso de metodologías para estudiar los eventos de inundación costera. Entre estas se pueden destacar la de (Toimil *et al.*, 2016), la cual tiene como finalidad el análisis de los efectos del cambio climático en las inundaciones costeras y permite representar de forma eficiente este fenómeno a escala regional. Por su parte, (Vousdoukas *et al.*, 2016) centran su estudio en el desarrollo de mapas de peligro para la representación de estos fenómenos para los países de Europa continental, haciendo especial énfasis en el efecto de la marea de tormenta. Por último, (Boettle *et al.*, 2016) trabajaron una metodología basada en la teoría de los eventos extremos, el ascenso del nivel medio del mar, la protección costera y el análisis de los daños.

En Cuba se han realizado varias investigaciones donde se han abordado el estudio de las inundaciones costeras en varias regiones de nuestro país, las cuales se han incrementado notablemente desde los años '90 (Mitrani *et al.*, 1994, 1999, 2000, 2012, 2016; Pérez, 1994; Moreno, 1998; Pérez *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 2002; Hidalgo & Mitrani, 2012, 2015, Hidalgo *et al.*, 2016, 2017, 2019; Povea & Mitrani, 2016; González *et al.*, 2017; Córdova *et al.*, 2018). Por su parte, todo lo contrario ha ocurrido en el estudio de los regímenes extremos de viento en zonas costeras, ya que las últimas publicaciones consultadas sobre este tema

datan de la última década del siglo pasado (Salas *et al.*, 1992; Salas & Mitrani, 1992; Mitrani *et al.*, 1994, 1999; Pérez, 1994; Mitrani & Salas, 1998). No obstante, la heterogeneidad de muchas de ellas no permite comparar los resultados obtenidos, debido a los diferentes métodos empleados así como a diversidad de fuentes de información empleadas.

La carencia de un procedimiento metodológico a nivel nacional que logre estructurar y homogenizar las investigaciones sobre esta temática en Cuba, así como la carencia de información meteorológica marina y oceanográfica en el país, ha provocado que los estudios antes mencionados sean heterogéneos en cuanto a la información primaria utilizada y los métodos aplicados. Todo ello ha imposibilitado realizar comparaciones en cuanto a la variabilidad espacial de este tipo de fenómeno entre dos o más tramos costeros cubanos. Por otro lado, algunas de las metodologías utilizadas a nivel internacional para estos fines (Boettle *et al.*, 2016; Toimil *et al.*, 2016; Vousdoukas *et al.*, 2016) no permiten resolver la problemática existente en Cuba.

Lo anterior conduce a que el objetivo de la presente investigación radique en desarrollar una metodología que estructure los estudios climáticos de inundaciones costeras en Cuba, a partir de la fuentes de información disponibles en Cuba y mediante la utilización de métodos estadísticos actualizados empleados por parte de la comunidad científica internacional.

En este sentido, la metodología que se presenta en este artículo científico ha sido empleada en este tipo de estudio en los últimos años en Cuba por diferentes autores (Hidalgo *et al.*, 2016, 2019; Ramírez *et al.*, 2017; Córdova *et al.*, 2018; Hernández *et al.*, 2019; Regueira & Barcia, 2019). La misma está acorde a la información meteorológica y las fuentes de información disponibles en Cuba, lo que ha permitido estructurar y homogenizar investigaciones relacionadas con las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento en Cuba, lo que contribuye a los planes de contingencia y acciones de manejo costero que se desarrollan en el país de

la reducción del riesgo de desastre y la adaptación al cambio climático en el marco de la “Tarea Vida”.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de los datos

Se emplearon los datos de las estaciones meteorológicas costeras cubanas de Cayo Coco (78339), Cabo Lucrecia (78365) y Punta de Maisí (78369). Además, los mapas sinópticos del nivel de superficie y Estados Generales del Tiempo (EGT) del Instituto de Meteorología (Insmet) y la base de datos sobre ciclones tropicales (HURDAT 2.0) del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos radicado en Miami, <http://www.nhc.noaa.gov> (Landsea & Franklin, 2013). Además, se emplearon los resúmenes de temporada ciclónica elaborados anualmente en el Insmet y

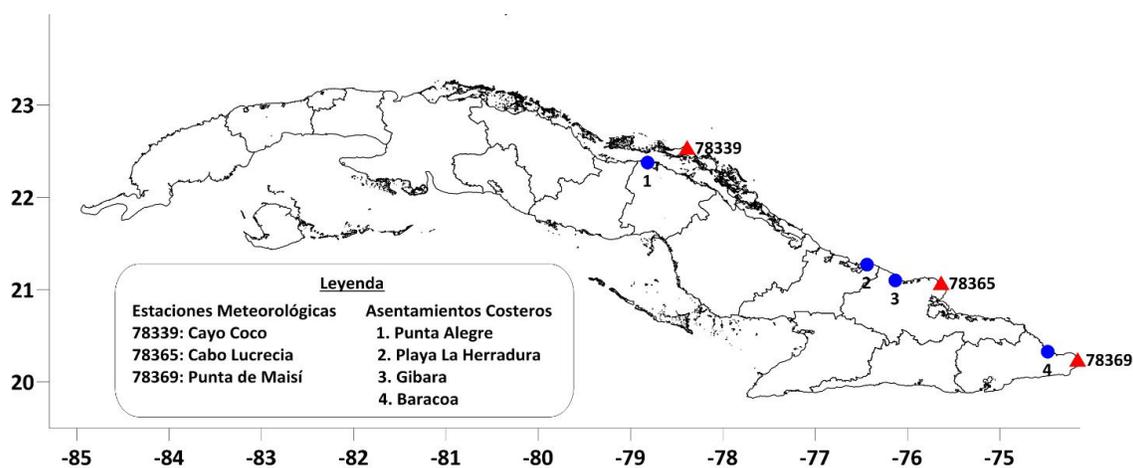
diferentes estudios de investigadores cubanos que abordan esta temática (Ortiz, 1973; Ramos, 2009; Insmet, 2012; Pérez, 2013).

Para la clasificación de las inundaciones costeras se empleó la tipificación propuesta por (Hidalgo et al., 2017) para los diferentes asentamientos costeros del territorio cubano que reportan este tipo fenómeno meteorológico extremo.

### Períodos de retorno y bondad de ajuste

El cálculo de la probabilidad del viento máximo se realizó a partir de la distribución de Gumbel, por intermedio del método de los máximos anuales. Según (USACE, 2006) la expresión matemática de esta función y de los coeficientes tienen las siguientes expresiones:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[\frac{x-B}{A}\right]\right] \quad (1)$$



**Figura 1.** Estaciones meteorológicas costeras y asentamientos costeros utilizados correspondientes a la costa norte de la región central y oriental de Cuba.

**Tabla 1.** Clasificación de las inundaciones costeras en para los asentamientos costeros que presentan mayores afectaciones en la costa norte de la región cenral y oriental de Cuba según el alcance horizontal del agua de mar tierra adentro. Elaborado a partir de (Hidalgo et al., 2017).

| Clasificación | Punta Alegre, Ciego de Ávila | Playa La Herradura, Las Tunas | Gibara, Holguín | Baracoa, Guantánamo                                 |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|---|
| Ligeras       | 0 - 50 m                     | 0 - 100 m                     | 0 - 250 m       | El agua avanza hasta la avenida contigua al malecón |
| Moderadas     | 51 - 100 m                   | 101 - 200 m                   | 251 - 500 m     | El agua de mar avanza hasta la Calle Maceo          |
| Fuertes       | ≥ 101 m                      | ≥ 201 m                       | ≥ 501 m         | El agua de mar avanza más allá de la Calle Maceo    |

$$A = 0.779s; B = \bar{x} - 0.45s \quad (2)$$

Donde:

$\bar{x}, s$  - Media y desviación estándar muestral respectivamente.

$e$  - Base de los logaritmos neperianos (2.71828).

En el caso del período de retorno de las inundaciones costeras se empleó la distribución de Poisson, para la cual se cumpliere 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:

$$P(x) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^x}{x!} \quad (3)$$

Donde:

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

$\lambda$  - Promedio del número de eventos por años.

$x$  - Número de eventos en el período de observación.

Para ambas variables (viento máximo y eventos de inundaciones costeras) el período de retorno según (USACE, 2006) se calcula de la siguiente manera:

$$T_r = \frac{1}{1 - P_a} \quad (4)$$

Donde:  $T_r$  y  $P_a$  son el período de retorno en años y la probabilidad acumulada.

Según (WMO, 1994), el intervalo de confianza para la estimación del período de retorno se determina de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$X_T \pm t(\alpha) \cdot \sqrt{1 + 1.14K_T + 1.1K_T^2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$K_T = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) \left( 0.5774 + \ln \ln \left[ \frac{T_r}{T_r - 1} \right] \right) \quad (6)$$

Donde:

$X_T$  - Valor de la variable que excede al período de retorno.

$t(\alpha)$  - Probabilidad en función del intervalo de confianza, 1.960 y 1.645 para el 95% y el 90% respectivamente.

$K_T$  - Factor de corrección que depende del período de retorno.

La bondad de ajuste se realizó por intermedio de las pruebas no paramétricas Pearson  $\chi^2$  para las inundaciones costeras y Kolmogorov- Smirnov (K-S) para el viento máximo. En el caso de  $\chi^2$  tenga

un solo grado de libertad, según (Dowdy *et al.*, 2004), se aplica la corrección de Yates:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(|F_{oi} - F_{ei}| - 0.5)^2}{F_{ei}} \quad (7)$$

Donde:

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

$k, n$  - Cantidad de clases y tamaño de la muestra.

$m$  - Cantidad de parámetros que se necesitan estimar, como es solamente ( $\lambda$ , media de la distribución)  $m=1$

$F_{oi}, F_{ei}$  - Frecuencia observada y estimada de la clase  $i$  respectivamente.

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

En el caso de la prueba no paramétrica K-S para una sola muestra se calcula según (Dickinson & Chakraborti, 2003; Wilks, 2011) como:

$$D_n = \max |F_n(x) - F(x)| \quad (8)$$

Donde:

$F_n(x)$  - Es la frecuencia o probabilidad empírica acumulada.

$F(x)$  - Es la probabilidad teórica acumulada.

Si  $D_n > C_\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula, o sea que la distribución escogida no es la mejor, la cual según (Wilks, 2011) se determina a partir de la siguiente expresión:

$$C_\alpha = \frac{K_\alpha}{\sqrt{n + 0.12} + 0.11/\sqrt{n}} \quad (9)$$

$K_\alpha$  - Es un coeficiente numérico que toma los valores de 1.358 y 1.628 para los niveles de significación del 5% y 1% respectivamente (Wilks, 2011).

## Tendencia estadística

Para el viento máximo anual se emplearon los test no paramétricos de Spearman, Mann-Kendall (M-K) y Pettitt de la siguiente manera, empleando el programa elaborado para este fin por (Mellado & Borraero, 1997):

a. Se calculó el test de Spearman y M-K para determinar la posible existencia de tendencia global en la serie.

b. Se aplicó la prueba de Pettitt si esta arroja un punto de cambio significativo cercano al test de M-K, en caso de esta última ser estadísticamente significativa.

Para probar el posible incremento o disminución de los eventos de inundación se aplicó la prueba de hipótesis de la proporción (Guerra *et al.*, 2006) a partir del siguiente estadígrafo:

$$z = \frac{x - np_0}{\sqrt{np_0(1 - p_0)}} \quad (10)$$

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. Para la aplicación de esta prueba el tamaño de la muestra debe ser mayor a 30 para que se cumple el Teorema Central del Límite, a partir del cual la distribución Binomial se puede aproximar a la Normal (Guerra *et al.*, 2006).

Si se desea probar como hipótesis nula ( $H_0$ ) que  $p_0 \geq p$ , o sea que la proporción de prueba es mayor que la referencia, para un nivel de significación del 5% está se rechazará si  $z < -1.645$ ; mientras que por el contrario si se analiza si las dos proporciones son diferentes entonces  $H_0$  se rechazaría para el mismo nivel de significación si  $z > 1.96$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Descripción de la metodología propuesta

La metodología propuesta cuenta con tres etapas, de las cuales las dos primeras han sido aplicadas por diferentes investigadores cubanos en varias zonas costeras de Cuba (Ramírez *et al.*, 2017; Córdova *et al.*, 2018; Hernández *et al.*, 2019; Regueira & Barcia, 2019), mientras que la tercera

está en fase de aplicación a nivel nacional a través del proyecto “Proyección de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano” (2018-2021), en el cual participan, además de los autores del presente artículo, más de veinte especialistas e investigadores de todos los Centros Meteorológicos Provinciales y de la Sede Central del Insmet.

**Etapas I.** En esta etapa se describen las características fundamentales de la zona de estudio, haciendo énfasis en la batimetría, las direcciones predominantes del oleaje, el *fetch*, así como la sobreelevación del nivel del mar predominante y el comportamiento de la marea astronómica en el régimen de inundaciones. Al mismo tiempo, se debe prestar especial atención a los rumbos más peligrosos y especificar si los mismos coinciden con la dirección del viento predominante. Además, se podrán realizar estudios climáticos de los regímenes normales de la velocidad del viento y el estado del mar para lo cual se podrán emplear las escalas Beaufort y Douglas, respectivamente según la disponibilidad de información meteorológica.

**Etapas II.** Esta fase se debe desarrollar partiendo de la necesidad de obtener la mayor información posible de los siguientes elementos:

- a. Fecha de ocurrencia del evento.
- b. Descripción de la situación sinóptica que generó la inundación costera.
- c. Fuentes de información utilizadas y particularidades.

En el último punto se deberá especificar la fuente utilizada: testimonio o entrevista a un poblador de la zona (nombre, edad y tiempo viviendo en el lugar), fuente periodística (título y fecha de la publicación), fuente de información científica (libro, artículo científico, reporte de

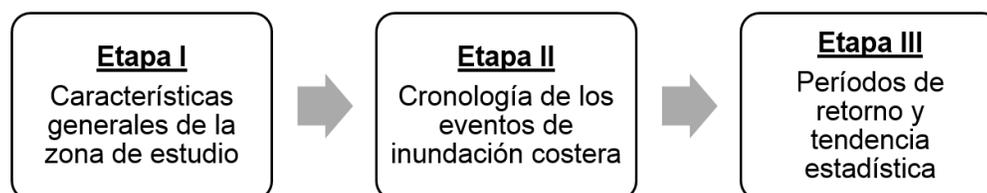


Figura 2. Etapas de la metodología para el estudio climático de las inundaciones costeras en Cuba.

investigación, etc.), archivo de los gobiernos locales e iglesias entre otras.

En el caso de los ciclones tropicales son varias las fuentes que pueden consultar ([Ortiz, 1973](#); [Ramos, 2009](#); [Insmet, 2012](#); [Landsea & Franklin, 2013](#); [Pérez, 2013](#)). Para los sistemas frontales, eventos “Sures” y la combinación de bajas extratropicales con los anticiclones migratorios se podrán tener en cuenta los resúmenes mensuales y los EGT que realiza el Centro de Pronóstico del Insmet. Para la tipificación de las inundaciones costeras en ligeras, moderadas y fuertes se recomienda emplear la nueva clasificación elaborada por ([Hidalgo et al., 2017](#)) a partir de los resultados obtenidos por ([Hidalgo et al., 2016](#)).

**Etapa III.** En esta fase se calcularán los períodos de retorno de los eventos de inundación y de los fuertes vientos determinando el número de casos por año y las probabilidades de 0.1 (1/10), 0.05 (1/20), 0.04 (1/25), 0.02 (1/50) y 0.01 (1/100), siempre y cuando la data cumpla el requerimiento de ser la mitad del período que se estima. La bondad de ajuste se realizará por intermedio de los test no paramétricos  $\chi^2$  para variables discretas (eventos de inundación) y K-S para variables continuas (viento máximo).

En el caso de la bondad de ajuste  $\chi^2$  para variables discretas, su principal dificultad radica en que es necesario varias clases y que las frecuencias esperadas sean superiores a 5. Sin embargo varios autores ([Cochran, 1954](#); [Dickinson & Chakraborti, 2003](#); [Dowdy et al., 2004](#)), señalan que el mencionado test puede aplicarse siempre y cuando las frecuencias esperadas sean superiores a 1.

### Discusión de la metodología propuesta

Los métodos propuestos se corresponden con los descritos en diferentes publicaciones sobre esta temática de la OMM (Organización Meteorológica Mundial) ([Sneyers, 1990](#); [WMO, 1994](#)), así como otros de amplio uso a nivel internacional ([Goda, 2000](#); [Coles, 2001](#); [Dickinson & Chakraborti, 2003](#); [USACE, 2006](#); [Caires, 2011](#); [Wilks, 2011](#)). Por su parte, la singularidad de la metodología propuesta, a diferencia de otras de gran actualidad que se emplean a nivel internacional ([Boettle et al.,](#)

[2016](#); [Toimil et al., 2016](#); [Vousdoukas et al., 2016](#)), está dado por la disponibilidad de la información meteorológica existente en Cuba, así como por la heterogeneidad de los métodos empleados en las investigaciones sobre esta temática en nuestro país.

Los dos métodos más utilizados para determinar el régimen extremo según ([Goda, 2000](#); [Coles, 2001](#); [USACE, 2006](#); [Caires, 2011](#)), son el de los máximos anuales a partir de la teoría General de los Valores Extremos (GEV por sus siglas en inglés) y el POT (Peak Over Threshold por su siglas en inglés). En el primero de ellos a partir de una serie de observaciones se selecciona el valor máximo anual; mientras que en el segundo se determinan el(los) valor(es) umbral(es). Algunos autores recomiendan emplear entre el 90-99 percentil para determinar estos umbrales ([Vinoth & Young, 2011](#); [Young et al., 2012](#); [Rodríguez et al., 2017](#); [Montoya et al., 2018](#)), o en su defecto el valor a partir del cual ocurre la inundación. En ambos casos los análisis deben realizarse para series de observación mayores a 20 años ([USACE, 2006](#)).

A nivel internacional son varios los autores que emplean el método POT en vez del de los máximos anuales ([Ferreira & Guedes, 1998](#); [Caires & Sterl, 2005](#); [Méndez et al., 2006](#); [Vinoth & Young, 2011](#); [Laface et al., 2016](#); [Feld et al., 2019](#); [Liang et al., 2019](#)). No obstante, la utilización solamente del método de los máximos anuales, está dado porque para el POT se necesitan series ininterrumpidas de la velocidad del viento, las cuales en muchas ocasiones no están disponible en el Servicio Meteorológico Nacional cubano.

El método propuesto para la estimación de los parámetros de la Distribución de Gumbel ([ecuación 2](#)) se emplea el método de los momentos, ya que según ([Wilks, 2011](#)) da resultados similares al de máxima verosimilitud. Este último método de estimación es el más robusto según ([WMO, 1994](#); [Goda, 2000](#); [Coles, 2001](#); [Dickinson & Chakraborti, 2003](#); [Caires, 2011](#); [Wilks, 2011](#)), sin embargo para la distribución de Gumbel no tiene solución analítica.

La expresión propuesta para determinar los valores del test no paramétrico K-S propuesto por

([Wilks, 2011](#)) a partir de la [ecuación 9](#), es una aproximación muy práctica de los valores de este test para una sola cola tal y como aparece en ([Dickinson & Chakraborti, 2003](#)).

## **Aplicación de la metodología propuesta a diferentes tramos costeros del archipiélago cubano**

### **Etapa I**

La costa norte de región oriental de Cuba presenta una plataforma estrecha abierta a los vientos del primer cuadrante, particularmente a los del NE-ESE. A través del archipiélago de las Bahamas existen pasos (Crooked, Mayaguana y Caicos) que permiten el tránsito del oleaje con suficiente energía para que la ruptura de este se produzca, libremente, sobre esta parte del país (ver [figura 3](#)). En esta zona son propicias las inundaciones costeras por rompiente de oleaje, siendo las ciudades más expuestas Baracoa y Gibara ([Hernández et al., 2002](#); [Hidalgo & Mitrani, 2012, 2015](#); [Hidalgo et al., 2017](#)), las cuales en los últimos años se han sido afectadas por eventos de inundación moderados y fuertes asociados al paso de los huracanes Ike (2008), Matthew (2016) e Irma (2017) ([Hidalgo et al., 2016, 2017](#)).

El *fetch* para la región coincide con el rumbo más peligroso NNE-NE, puesto que para estas direcciones el oleaje es perpendicular a la línea costera, mientras que el oleaje se mantiene con fuerza 2-3 en la Escala Douglas (0.25-1.25 m) durante todo el año; sin embargo, con la presencia de frentes fríos, anticiclones migratorios y ciclones tropicales, este llega hasta fuerza 4 (1.25- 2.5 m) y, en algunas ocasiones, puede alcanzar fuerza 5-6 (2.5- 6 m). El régimen de vientos es dominado, principalmente, por la combinación de la circulación de las brisas marinas y los alisios; la dirección predominante es del primer cuadrante (75% del total de casos anual), con velocidades que oscilan entre 18-25 km/h. Las corrientes de mareas se orientan al sur en el flujo y al norte en el refluo; estas se clasifican como semidiurnas, con valores medios que oscilan entre 0.4 m y 0.7 m; en sicigia, la pleamar puede llegar hasta 0.9 m ([GEOCUBA, 2003](#)).

### **Etapa II**

A continuación se describe la inundación costera provocada en el poblado de Cascarero, provincia de Las Tunas, al paso del huracán Ike el 8 de septiembre de 2008, la cual a su vez constituye la mayor inundación costera ocurrida en este asentamiento costero.

#### **a) Descripción sinóptica**

Ike se originó en el seno de una onda tropical en la madrugada del 1° de septiembre del 2008 sobre el Atlántico Central. Se convierte en huracán en la tarde del día 3 y desde esa tarde se intensificó con rapidez pasando a ser un huracán de categoría 3 en la noche a uno de categoría 4 en la madrugada del día 4, con vientos máximos de 230 km/h y una presión mínima de 935 hPa. Tuvo fluctuaciones en su intensidad durante los días 5 y 6 debido a una fuerte cizalladura vertical del viento, sin embargo en la tarde del día 6 alcanzó nuevamente la categoría 4 con vientos máximos del orden de 215km/h. Tocó tierra cubana por las inmediaciones de Cabo Lucrecia, en la provincia de Holguín, a las 2101Z del día 7 de septiembre. Se movió por la zona costera desde de los municipios Banes, Rafael Freyre y Gibara, manteniendo una parte de la circulación sobre tierra y otra sobre el mar, conservando la misma intensidad. Luego continuó su movimiento al Oeste y su centro comenzó a trasladarse por la provincia de Las Tunas en las primeras horas de la madrugada del día 8, con vientos máximos del orden de los 185 km/h como un huracán de categoría 2.

#### **b) Particularidades de la inundación costera**

Las inundaciones costeras ocurrieron en toda la costa norte de la provincia de Las Tunas, entre la madrugada y la mañana del día 8. En el poblado de Cascarero (las inundaciones llegaron aproximadamente hasta unos 200m tierra adentro), hasta la placita ubicada al sur de la localidad, de acuerdo con el testimonio del poblador José Valdés Pavón (Alias Pepito Banes) de 78 años de edad y su esposa Eslinda Sánchez Nápoles. Algunas embarcaciones de pescadores fueron arrastradas tierra adentro hasta aproximadamente 80 metros.

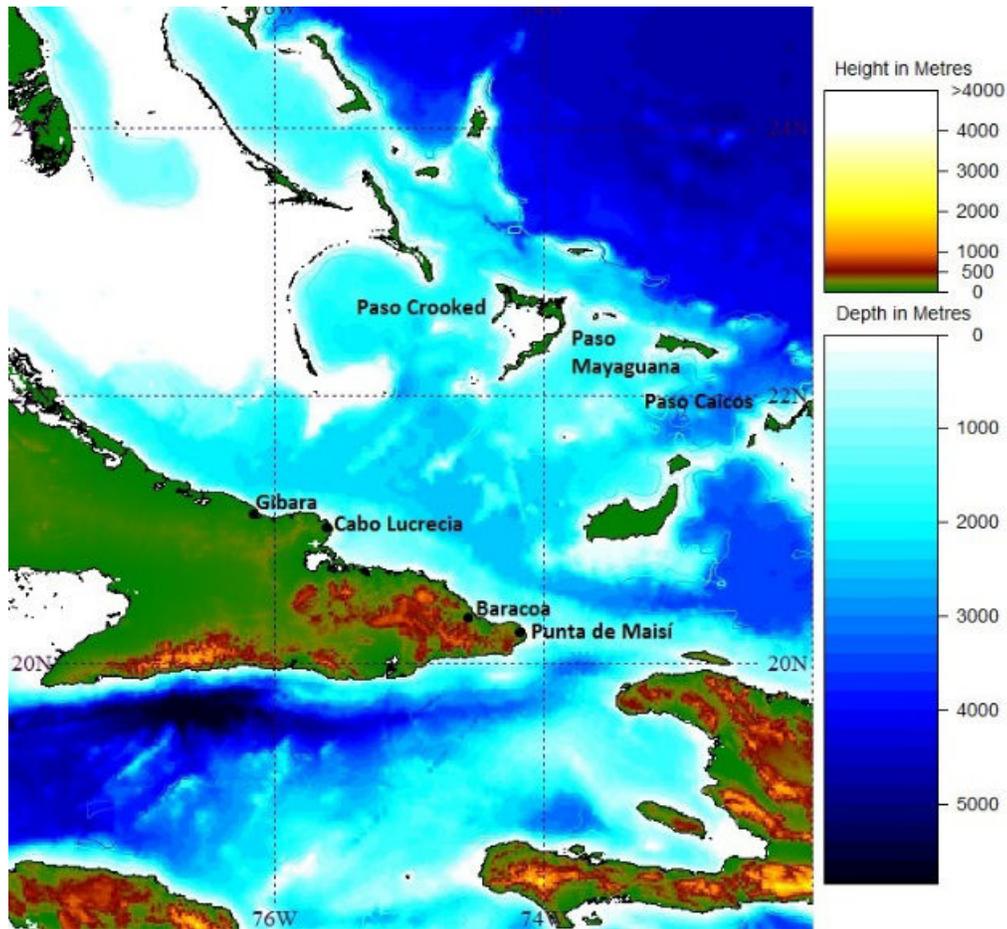


Figura 3. Costa norte de la región oriental de Cuba. Elaborado a partir de información del Atlas GEBCO ([British Oceanographic Data Center, 2009](http://www.gebcosurveyors.org/)).

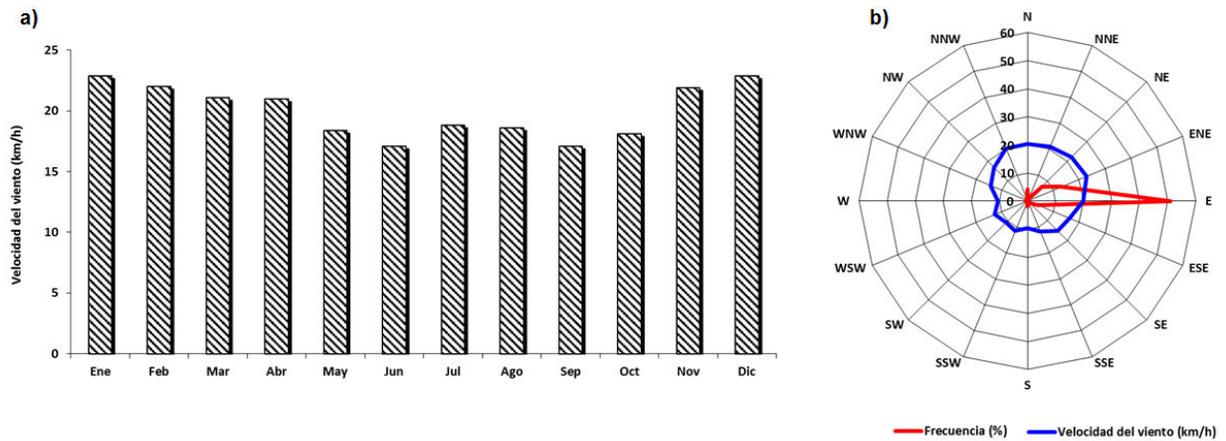
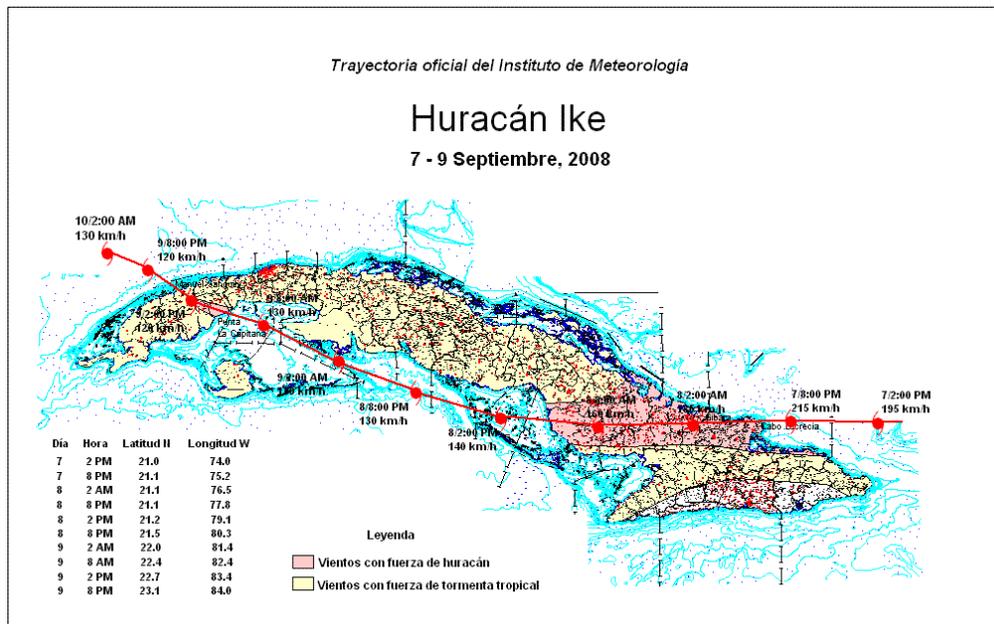


Figura 4. Marcha interanual de la velocidad del viento (a) y rosa de los viento (b) en la estación meteorológica de Cabo Lucrecia durante el período 1992-2012.



Tomado de <http://www.insmet.cu/Temporadas/imagenes2008/Image17.gif>

**Figura 5.** Trayectoria del huracán Ike sobre Cuba.



**Figura 6.** Marca de agua en una vivienda (izquierda) y afectaciones la Cafetería El Flamenco (derecha).

En Playa La Herradura la penetración del mar fue entre 60-260 m y la altura de la ola se estimó entre 3-5 m.

c) Fuentes de Información consultadas

- Testimonio de José Valdés Pavón (78 años, natural de Banes Holguín, vive en Cascarero hace 50 años). La entrevista se realizó el 5 de junio del 2015.
- Testimonio de María Del Carmen Fernández Santos, secretaria FMC (49 años, natural de Cascarero, donde vive desde que nació). La entrevista se realizó el 16 de julio del 2015.
- Periódico *Granma*, Órgano Oficial del Comité Central del Partido Comunista de Cuba, lunes 8 de septiembre de 2008.

- Periódico *Juventud Rebelde*, Diario de la Juventud Cubana, martes 9 de septiembre de 2008.
- *Periódico 26*, Órgano Oficial del Comité Provincial del Partido Comunista de Cuba en Las Tunas, sábado 13 de septiembre de 2008.
- Resumen de la temporada ciclónica de 2008. <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2008.html>
- Archivos del Grupo Provincial de Pronóstico del CMP de Las Tunas.
- Libro: Huracanes. Desastres naturales en Cuba, de Luis E. [Ramos Guadalupe, publicado en 2009](#) por la Editorial Academia.

### Etapa III

Las mayores inundaciones costeras en la provincia de Villa Clara hasta la fecha han ocurrido en los asentamientos de Caibarién e Isabela de Sagua, para los cuales se calculó el período de retorno de los eventos moderados y fuertes (son aquellos donde el alcance horizontal del agua de mar tierra adentro es mayor a 250 m) ([Hidalgo et al., 2017](#)).

Para estos dos asentamientos durante el período 1900-2018 ocurrieron 11 eventos para un valor medio de 0.0924 eventos moderados o fuertes por año. En este caso la aplicación de la distribución de Poisson resultó idónea para un nivel de significación del 5%, ya que el valor  $\chi^2 = 0.0250 < \chi^2_{0.95}(1) = 3.84$ , arrojando que es de esperarse un evento de inundación moderada o fuerte en un mismo año ocurra cada 11.3 años.

Para la costa norte de Ciego de Ávila, a partir de los datos meteorológicos de la estación meteorológica de Cayo Coco, la distribución de Gumbel resultó adecuada de acuerdo a la prueba K-S para el nivel de significación del 5% (  $K-S = 0.1756 < C_{\alpha=5\%} = 0.2155$  ). A partir de la cual es de esperarse al menos una vez en diez y cincuenta años velocidades del viento entre 100-150 km/h y 125-195 km/h con un intervalo de confianza del 95% respectivamente.

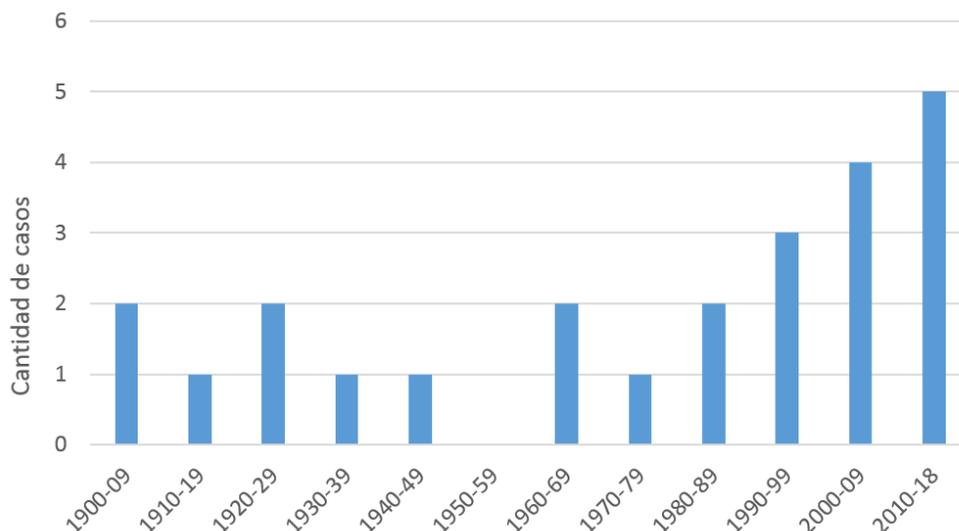
**Tabla 2.** Períodos de retorno de los vientos máximos de acuerdo al método de los máximos anuales para la costa norte de la provincia de Ciego de Ávila.

| Período de Retorno | Velocidad del viento |
|--------------------|----------------------|
| 1/10               | 125±25 km/h          |
| 1/25               | 145±30 km/h          |
| 1/50               | 160±35 km/h          |

La diferencia entre los períodos de retorno obtenidos en este trabajo y los graficados por ([Pérez, 1994](#)), está dada por el aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales en esta región desde inicios del siglo XXI, producto del incremento de la actividad ciclónica en el territorio cubano ([Ballester et al., 2010](#))

En la [figura 7](#) se muestra el comportamiento por décadas de las inundaciones costeras, en sus tres intensidades, para la ciudad de Gibara donde a partir de la década de los '80 ocurrieron el 58% de los eventos acontecidos en el período 1900-2018. De las mismas, se puede apreciar un aumento de la frecuencia relativa, la cual es estadísticamente significativa, ya que resultó que  $z = 4.42 > -Z_{0.95} = -1.645$  al aplicarles la prueba de la proporción. Es de destacar que la mayor inundación costera ocurrida en la Villa Blanca holguinera ocurrió al paso del huracán Ike (2008).

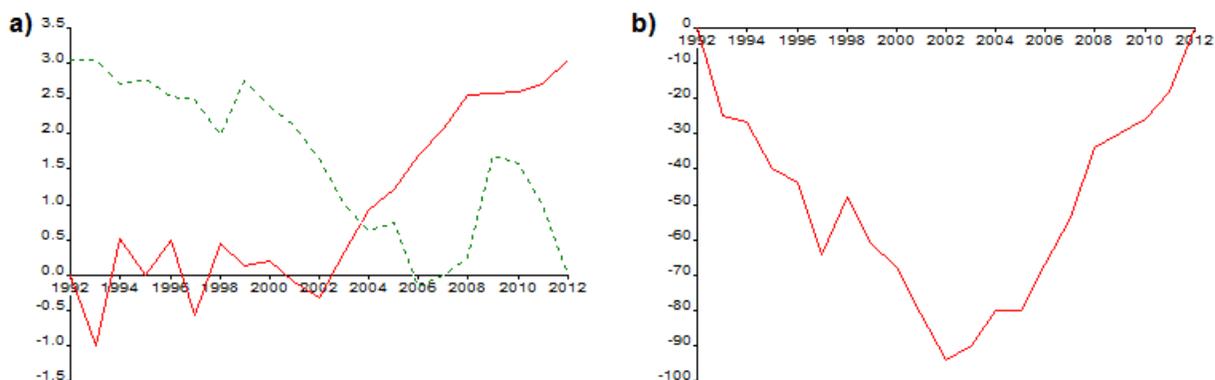
El viento máximo anual para la estación meteorológica de Cabo Lucrecia, (ver [tabla 3](#) y [figura 8](#)), presenta tendencia global estadísticamente significativa para el nivel de significación del 5%, con un punto de cambio hacia el año 2002 y una sola intersección en 2004 por intermedio de las pruebas de Pettitt y Mann-Kendall respectivamente. El incremento de la velocidad máxima del viento anual está relacionado con el aumento de la actividad ciclónica que ha experimentado nuestro país a partir de 1996 ([Ballester et al., 2010](#); [Hidalgo & Mitrani, 2015](#); [Mitrani et al., 2016, 2017](#)).



**Figura 7.** Comportamiento por décadas de los eventos de inundación costera para la ciudad de Gibara durante los siglos XX y XXI.

**Tabla 3.** Valores de las pruebas Spearman, M-K y Pettitt empleadas en el análisis de tendencia del viento máximo anual para la estación meteorológica de Cabo Lucrecia durante el período 1992-2012.

| Pruebas       | Valores   |
|---------------|---|
| Spearman      | Spearman: 3.037568 (Tendencia global significativa) $\alpha_1=0.0024 < \alpha_0=0.0500$                                     |
| Mann- Kendall | Mann-Kendall: 2.827090 (Tendencia global significativa) $\alpha_1=0.0047 < \alpha_0=0.0500$<br>Una sola intersección (2004) |
| Pettitt       | Valor Extremo: -94.0 (Punto de cambio en 2002) $\alpha_1=0.0042 < \alpha_0=0.0500$  |



**Figura 8.** Velocidad máxima anual del viento para la estación meteorológica de Cabo Lucrecia en el período 1992-2012 representada por la prueba de Mann- Kendall (a) y el estadígrafo de Pettitt (b).

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta está basada en las fuentes de información disponibles en Cuba y está sustentada en los métodos estadísticos empleados por parte de la comunidad científica internacional. Los procedimientos propuestos son aplicables a cualquier zona costera, independientemente de las características físico-geográficas, las particularidades de los sistemas meteorológicos que generan los eventos de inundación costera, así como la frecuencia e intensidad de los mismos; lo que permite la estructuración y homogenización de los estudios climáticos sobre inundaciones costeras en el territorio cubano.

La metodología propuesta se aplicó en sus tres etapas para la costa norte de las regiones oriental y central del territorio cubano. A partir de la misma se pudo determinar una tendencia creciente, estadísticamente significativa para el nivel de significación del 5%, de la velocidad máxima anual del viento y de los eventos de inundación en la costa norte oriental, tanto en frecuencia como en intensidad, desde inicios del siglo XXI.

Las distribuciones teóricas de Poisson y Gumbel para las costas nororiental y norte central de Cuba resultaron idóneas para el nivel de significación del 5% por intermedio de las pruebas de bondad de ajuste  $\chi^2$  y Kolmogorov-Smirnov respectivamente. A partir de las mismas se pudo determinar que para Caibarién e Isabela de Sagua un evento moderado o fuerte pudiera ocurrir al menos una vez cada 11.3 años; mientras que para la costa norte de Ciego de Ávila, para un intervalo de confianza del 95%, se espera que una vez en diez años la velocidad del viento alcance valores entre 100-150, en tanto para una probabilidad de 0.02 estas magnitudes pudieran fluctuar entre 125-195 km/h.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la dirección del Insmet y al Programa “Meteorología y Desarrollo Sostenible del País” por permitirnos desarrollar los proyectos “Procedimiento para la ejecución y uso de las observaciones del estado de la superficie marina desde estaciones costeras, en la predicción del oleaje e inundaciones costeras en territorio cubano”

(2015-2016) y “Proyección de las inundaciones costeras en el archipiélago cubano” (2018-2021), en el marco del cual se obtuvieron los resultados que se presentan en este artículo científico.

## REFERENCIAS

- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 2010. *Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico*. La Habana: Editorial Academia, 170 p., ISBN: 978-959-270-175-5.
- Boettle, M.; Rybski, D. & Kropp, J. P. 2016. “Quantifying the effect of sea level rise and flood defence - a point process perspective on coastal flood damage”. *Natural Hazard and Earth Systems Sciences*, 16: 559-579, DOI: 10.5194/nhess-16-559-2016.
- British Oceanographic Data Center 2009. *GEBCO Digital Atlas*. version 2.12, [ Windows ], Liverpool, United Kingdom: Natural Environment Research Council, Available: <[https://www.bodc.ac.uk/resources/help\\_and\\_hints/software\\_updates/documents/gda\\_v2.12\\_software.zip](https://www.bodc.ac.uk/resources/help_and_hints/software_updates/documents/gda_v2.12_software.zip)>.
- Caires, S. 2011. *Extreme Value Analysis: Wave Data*. (ser. JCOMM Technical Report No. 57), Geneva: World Meteorological Organization and Intergovernmental Oceanographic Commission, 33 p.
- Caires, S. & Sterl, A. 2005. “100-Year Return Value Estimates for Ocean Wind Speed and Significant Wave Height from the ERA-40 Data”. *Journal of Climate*, 18(7): 1032-1048.
- Cochran, W. G. 1954. “Some methods for strengthening the common  $\chi^2$  test”. *Biometrics*, 10(4): 417-451.
- Coles, S. 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. (ser. Springer Series in Statistics), London: Springer-Verlag London, 208 p., ISBN: 1-85233-459-.
- Córdova, O., L.; García, M. & López, A. 2018. “Cronología de las inundaciones costeras en la provincia de Ciego de Ávila. Periodo 1960-2017”. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(2): 136-145, ISSN: 0864-151X.
- 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.
- Feld, G.; Randell, D.; Ross, E. & Jonathan, P. 2019. "Design conditions for waves and water levels using extreme value analysis with covariates". *Ocean Engineering*, 173: 851-866, ISSN: 0029-8018, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.10.027.
- Ferreira, J. A. & Guedes, C. 1998. "An Application of the Peaks Over Threshold Method to Predict Extremes of Significant Wave Height". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(8): 165-176.
- GEOCUBA 2003. *Derrotero de las costas de Cuba*. La Habana: Agencia de Cartografía Náutica.
- 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.
- González, C. M.; González, P. & Hernández, J. F. 2017. "Evaluación de la afectación del huracán Irma, utilizando la modelación numérica en las provincias de Artemisa y Mayabeque". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3): 363-377, ISSN: 0864-151X.
- 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, N.; Perigó, E.; Rojas, Y.; Laborde, N.; Pérez, Y.; Ortega, F. E.; Pérez, O. E.; Casals, R. & Cabrales, J. 2019. *Cronología de las inundaciones costeras en Baracoa y cálculo del período de retorno de los organismos ciclónicos tropicales que han generado fuertes marejadas en el período 1871 - 2018*. Resultado Científico, La Habana: Instituto de Meteorología, p. 57.
- Hernández, N.; Vega, R. & Casals, R. 2002. "Estudio de los Sistemas Meteorológicos que han afectado a Baracoa por penetraciones del mar e inundaciones costeras". *Revista Cubana de Meteorología*, 9(2): 58-68.
- Hidalgo, A.; Hernández, N. & 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): 191-202.
- Hidalgo, A. & Mitrani, I. 2012. "Particularidades hidrometeorológicas del litoral Gibara-Playa Guardalavaca". *Revista Cubana de Meteorología*, 18(2): 152-163, ISSN: 0864-151X.
- Hidalgo, A. & Mitrani, I. 2015. "Tendencias climáticas de las inundaciones costeras en el litoral Gibara-Playa Guardalavaca, provincia Holguín, Cuba". *Revista de Climatología*, 15: 93-102, ISSN: 1578-8768.
- Hidalgo, A.; Mitrani, I. & Pérez, G. 2017. "Nueva clasificación de las inundaciones costeras en Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2): 209-216, ISSN: 0864-151X.
- 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.
- Insmet 2012. *Atlas Climático de Cuba*. La Habana: Grupo Empresarial Geocuba, 217 p., ISBN: 92-63-10781-5.
- Laface, V.; Malara, G.; Romolo, A. & Arena, F. 2016. "Peak over threshold vis-à-vis equivalent triangular storm: Return value sensitivity to storm threshold". *Coastal Engineering*, 116: 220-235, ISSN: 0378-3839, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.06.009.
- Landsea, C. W. & Franklin, J. L. 2013. "Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format". *Monthly Weather Review*, 141(10): 3576-3592, ISSN: 0027-0644, DOI: 10.1175/MWR-D-12-00254.1.
- Liang, B.; Shao, Z.; Li, H.; Shao, M. & Lee, D. 2019. "An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights". *Coastal*

- Engineering*, 144: 22-32, ISSN: 0378-3839, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2018.12.001.
- Mellado, E. & Borrajero, I. 1997. *Programa para el Cálculo de Índices de Tendencia en Series Temporales*. version 2.0, La Habana: Instituto de Meteorología .
- Méndez, F., J.; Menéndez, M.; Luceño, A. & Losada, I., J. 2006. "Estimation of the long-term variability of extreme significant wave height using a time- dependent Peak Over Threshold (POT) model". *Journal of Geophysical Research*, (111), DOI: 10.1029/2005JC003344, .
- Mitrani, I.; Díaz, O. O.; Vichot, A.; Hernández, I.; Hidalgo, A.; García, E. & 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, ISSN: 1729-3790.
- Mitrani, I.; García, E.; Hidalgo, A.; Hernández, I.; Salas, I.; Pérez, R.; Díaz, O. O.; Vichot, A.; Pérez, A.; Cangas, R.; Álvarez, L.; Pérez, O., E.; Rodríguez, J. A.; Rodríguez, C. M.; Pérez, A. L.; Morales, A.; Viamontes, J. & Pérez, J. 2017. *Inundaciones costeras en Cuba y sus tendencias climáticas*. La Habana: CITMATEL, 192 p., ISBN: 978-959-237-730-1, Available: <<http://www.libreriavirtualcuba.com>>, [Consulted: February 7, 2018 ].
- Mitrani, I.; Hernández, I.; García, E.; Hidalgo, A.; Díaz, O. O.; Vichot, A. & Rodríguez, J. A. 2016. "The Coastal Flood Regime around Cuba, the Thermohaline Structure Influence and Its Climate Tendencies". *Environment and Ecology Research*, 4(2): 37-49, DOI: 10.13189/eer.2016.040201.
- Mitrani, I.; Pérez, R.; García, O.; Salas, I.; Juantorena, J.; Ballester, M.; Beauballet, P.; Pérez, A. L. & 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. & Salas, I. 1998. "Elaboración del régimen de olaje extremo por métodos numéricos.". In: *Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva.*, La Habana: Instituto de Meteorología , pp. 73-81.
- Mitrani, I.; Vega, R.; Pérez, R.; Díaz, L.; Salas, I.; Barreras, O.; Pérez, P. J.; Casals, R. & del Sol, A. 1994. *Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero*. Informe Técnico, La Habana: Instituto de Meteorología .
- Mitrani, I.; Vega, R.; Pérez, R. & Salas, I. 1999. "Determinación de las características extremas del viento, el oleaje y la sobreelevación del nivel del mar en las costas de Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 6(1): 38-42.
- 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.
- Moreno, A. 1998. *Desarrollo de las Técnicas de Predicción de las Inundaciones Costeras, Prevención y Reducción de su Acción Destructiva*. Informe Final del Proyecto Cuba 94/003, no. Proyecto Cuba 94/003, La Habana: Instituto de Meteorología , p. 172.
- Ortiz, R. 1973. *Trayectoria de Huracanes y de Perturbaciones Ciclónicas del Océano Atlántico, del Mar Caribe y del Golfo de México (1919-1969)*. La Habana: Editorial Organismos, 109 p.
- Pérez, P. J. 1994. *Estudio del régimen de vientos y olas en diferentes zonas marinas de interés socioeconómico para Cuba*. Informe Técnico, La Habana: Instituto de Meteorología .
- Pérez, P. J.; Casals, R.; del Sol, A. & Díaz, L. 2001. "Análisis de los fenómenos meteorológicos que provocaron penetraciones del mar en el malecón habanero". *Revista Cubana de Meteorología*, 8(1): 50-58, ISSN: 0864-151X.
- Pérez, R. 2013. *Cronología de los huracanes de Cuba*. Reporte de Investigación, La Habana: Instituto de Meteorología , p. 8.
- Povea, Y. & Mitrani, I. 2016. "Particularidades de las inundaciones costeras en la bahía de Mariel". *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 17(2): 160-170, ISSN: 1729-3790.
- Ramírez, W.; Pérez, Y. & Estrada, E. 2017. "Procedimiento para la estimación del estado de la superficie marina y cronología de inundaciones costeras en Guayabal y Cascarero". *Revista de Innovación Tecnológica. CIGET. Las Tunas.*, 23(3).

- Ramos, L. E. 2009. *Huracanes. Desastres Naturales en Cuba*. La Habana: Editorial Academia, 192 p., ISBN: 978-959-270-161-8.
- Regueira, V. A. & Barcia, S. 2019. "Cronología de inundaciones costeras por penetración del mar, en la provincia Cienfuegos". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(0), ISSN: 2664-0880, Available: <<http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/475>>, [Consulted: August 28, 2019].
- Rodríguez, J. Á.; Yanes, A. & Dorta, P. 2017. "Determinación y caracterización de situaciones de temporal marino e inundación costera por rebase del oleaje en San Andrés, NE de Tenerife (1984-2014)". *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (68): 95-114, ISSN: 0213-4691.
- Salas, I. & Mitrani, I. 1992. "Elementos de ola de viento en un ciclón tropical". *Revista Cubana de Meteorología*, 5(2): 40-44.
- Salas, I.; Moreno, A.; Mitrani, I. & Lezcano, J. C. 1992. "Oleaje máximo y régimen hidroclimático de la costa sur de la región oriental.". *Revista Cubana de Meteorología*, 5(1): 12-16.
- Sneyers, R. 1990. *On the statistical analysis of series of observation*. Geneva: World Meteorological Organization, 192 p., ISBN: 92-63-10415-8.
- Stocker, T., F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S., K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. & Midgley, P., M. (eds.). 2013. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 203 p., ISBN: ISBN 978-92-9169-138-8.
- Toimil, A.; Losada, I., J. & Camus, P. 2016. "Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias". *Revista Iberoamericana del Agua*, 3(2): 56-65, DOI: 10.1016/j.riba.2016.07.004.
- USACE 2006. *Coastal Engineering Manual*. (no. ser. Engineer Manual 1110-2-1100), vol. II, Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1720 p., Available: <[http://download.library1.org/main/1006000/3b661a9d3c9015dfaa094a55e39eb279/-Coastal%20Engineering%20Manual-U.S.%20Army%20Corps%20of%20Engineers%20%282002\\_%202006%29.pdf](http://download.library1.org/main/1006000/3b661a9d3c9015dfaa094a55e39eb279/-Coastal%20Engineering%20Manual-U.S.%20Army%20Corps%20of%20Engineers%20%282002_%202006%29.pdf)>, [Consulted: November 8, 2018].
- 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.
- Vousdoukas, M., I.; Voukouvalas, E.; Mentaschi, L.; Dottori, F.; Giardino, A.; Bouziotas, D.; Bianchi, A.; Salamon, P. & Feyen, L. 2016. "Developments in large-scale coastal flood hazard mapping". *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 16: 1841-1853, DOI: 10.5194/nhess-16-1841-2016.
- Wilks, D. S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Third Edition ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier/Academic Press, 676 p., ISBN: 978-0-12-385022-.
- WMO 1994. *Guide to the Applications of Marine Climatology*. (no. ser. WMO # 781), Geneva: World Meteorological Organization, 144 p., ISBN: 92-63-10781-5.
- Young, I. R.; Vinoth, J.; Zieger, S. & Babanin, A. V. 2012. "Investigation of trends in extreme value wave height and wind speed". *Journal of Geophysical Research*, 117, DOI: 10.1029/2011JC007753.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Los autores de este trabajo declaran presentar una participación igualitaria en la concepción, ejecución y escritura de la investigación.

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/)