



Revista Cubana de Meteorología

ISSN: 2664-0880

Instituto de Meteorología

Roura-Pérez, Pedro; Díaz-Sistachs, Dalia
Metodología de viento máximo y probabilidad de afectación por huracanes en Cuba
Revista Cubana de Meteorología, vol. 26, núm. 4, e08, 2020
Instituto de Meteorología

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977551008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Metodología de viento máximo y probabilidad de afectación por huracanes en Cuba

Methodology of maximum wind and probabilities of affectation for hurricanes in Cuba



<https://eqrcode.co/a/BjPboJ>

Pedro Roura-Pérez ^{1*}, Dalia Díaz-Sistachs ²

¹Centro del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

²Facultad de Matemática y Computación, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

RESUMEN: Los más grandes desastres naturales que recoge la historia de nuestro país han estado asociados a los ciclones tropicales, los cuales generan fuertes vientos. Por este motivo es muy importante para el Instituto de Meteorología y en especial para el Centro del Clima tener una metodología para la obtención de los periodos de retorno de la variable meteorológica viento máximo, por lo que se han desarrollado herramientas computacionales a través de métodos estadísticos con los cuales podemos brindar servicios, obtener beneficios económicos y desarrollar una mejor investigación. Dentro de las herramientas computacionales que se presentan están una aplicación de nombre TkHURS.exe, para el cálculo de periodos de retorno y el cálculo de las frecuencias estimadas de huracanes a través del ajuste de un Modelo de Poisson a la variable que cuenta el número de huracanes por año que han azotado a Cuba y SEVECLIM.exe, para el cálculo de periodos de retorno de variables climatológicas extremas a través de diferentes distribuciones de probabilidad para obtener el mejor modelo de ajuste a los datos y estimar los valores esperados de los periodos de retorno. Con el modelo más representativo en el ajuste de los datos, se permite dar estimados más cercanos a la realidad y brindar un mayor conocimiento del régimen de la variable en cuestión. La metodología propuesta en este trabajo brinda una mejor comprensión a la hora de utilizar los softwares.

Palabras clave: huracanes, valores extremos, vientos máximos, distribuciones de probabilidad y período de retorno.

ABSTRACT: The greatest natural disasters of our country history has been associated with tropical cyclones. For this reason is very important for the Meteorological Institute, especially for the Clime Center due to the characterization of the meteorological variable maximum wind. For this reason a series of software's were developed to provide these services thus obtaining relevant information as well as an economical gain and develop better research. Among the computational tools presented is an application called TkHURS.exe, to calculate return periods and the calculation of estimated hurricane frequencies, through the adjustment of a Poisson Model of the variable that counts the number of hurricanes per year that have affected Cuba. Other software is SEVECLIM.exe, which is used to calculate return periods of extreme climatological variables through different probability distributions, to obtain the model that best fit the data, to estimate the return periods, as well as the main statistics. With the model that best fit the data, it is possible to be closer to reality thus providing a better knowledge of the regime of the studied variable. The methodology proposed in this work provides a better understanding of the software's utilization.

Key words: hurricanes, extreme value, maximum wind, probability distributions and return periods.

*Autor para correspondencia: Pedro Roura-Pérez. E-mail: pedro.roura@insmet.cu

Recibido: 06/06/2020

Aceptado: 23/07/2020

INTRODUCCIÓN

El principal factor a considerar en Cuba para evaluar el peligro de carácter meteorológico que enfrentan las construcciones en Cuba es la probabilidad de ocurrencia de valores máximos anuales de la velocidad del viento en cada región del país. Entre las causas que originan la velocidad máxima del viento en Cuba se encuentran los ciclones tropicales del atlántico norte que se clasifican según la variable velocidad máxima sostenida del viento (V_{max}) en un intervalo de un minuto (Tabla 1), los sistemas extratropicales de la temporada invernal (noviembre-abril): bajas extratropicales, sistemas frontales y frentes fríos, las tormentas locales severas típicas del verano y los brisotes fuertes debidos a la influencia de las altas presiones continentales u oceánicas (Roura et al., 2019b). En esta época ocurren los vientos llamados "Sures" por bajas extratropicales en el Golfo de México y los "Nortes" típicos por altas presiones continentales que se reportan luego del paso de un frente frío. Estos vientos pueden causar penetraciones del mar en zonas costeras. Entre estos fenómenos, los huracanes resultan ser los más importantes pues, han producido los valores de la velocidad del viento más altos que se han registrado. La clasificación de huracanes se realiza mediante la escala SS de Saffir-Simpson de cinco categorías que asocia intervalos de presión atmosférica mínima (P_{min}) con intervalos de vientos máximos sostenidos en un intervalo de un minuto (Tabla 2), (Roura et al., 2019b).

Tabla 1. Clasificación de organismos ciclónicos tropicales según viento máximo en el Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET)

Denominación	V_{max} (km/h)
Depresión	< 63
Tormenta tropical	64 - 118
Huracán de poca intensidad	119 - 153
Huracán de moderada intensidad	154 - 208
Huracán de gran intensidad	$\geq$ 209

La Surgencia ("marea de tormenta") se refiere a la sobreelevación del nivel del mar por el efecto del viento y la disminución de la presión atmosférica en el centro del sistema: la marea de tormenta alcanzó el valor de 6.5 m en el huracán que destruyó literalmente la población de Santa Cruz del Sur (provincia Camagüey) en 1932. Se conoce que a mayor intensidad de un huracán le corresponde menor presión atmosférica en el vórtice, pero el conocimiento de un dato de presión atmosférica mínima no es suficiente para clasificar adecuadamente un huracán. Por ejemplo: en octubre 18 de 1944 a las 09:30 horas se observó una mínima barométrica de 724.00 mm = 965 hPa en la estación meteorológica de Casablanca, pero a las 09:55 horas una racha máxima alcanzó el valor de 72.8 m/s = 262 km/h que conjuntamente con los daños causados por el "huracán del 44" en La Habana se catalogó que afectó a la capital con categoría SS4 (el vórtice no cruzó sobre dicha ciudad). Si se conoce V_{max} , para el cálculo de R_{max} la expresión:

$$R_{max} \approx \frac{1}{2} \{ (V_{max} + 0.30 V_{max}) + (V_{max} + 0.50 V_{max}) \} \quad (1)$$

Tabla 2. Escala SS de Saffir-Simpson (simplificada) para la clasificación de huracanes

Categorías	$P_{min}(hPa)$	$V_{max}(km/h)$	Surgencia (pies)	Daños
SS1	$\geq$ 980	119 - 153	4 - 5	Mínimos
SS2	965 - 979	154 - 177	6 - 8	Moderados
SS3	945 - 964	178 - 208	9 - 12	Extensos
SS4	920 - 944	209 - 251	13 - 18	Extremos
SS5	$\leq$ 919	$\geq$ 252	$\geq$ 19	Catastróficos

Otra forma de calcular sería:

$$R_{max} \approx V_{max} + 0.25 V_{max} \quad (2)$$

Siendo:

$$V_{max} = 16 \sqrt{P_m - P_o} \quad (3)$$

Tal que P_m y P_o son las presiones atmosféricas en hPa a lo largo de la periferia del sistema ($P_m \approx 1010 \text{ hPa}$) y P_o es la presión atmosférica mínima en el vórtice; de esta manera se estimaron los valores de $V_{max} \approx 231 \text{ km/h}$ y $R_{max} \approx 288 \text{ km/h} = 80 \text{ m/s}$ para el "Huracán del 26" (octubre 20 de 1926), de categoría SS4 en La Habana (Vega et al., 1998). Las tormentas locales severas del verano (incluyendo tornados que pueden ocurrir también en una línea prefrontal en el invierno y por la influencia de un ciclón tropical); que ocurren con la mayor frecuencia en el período junio-septiembre; el número de días con tormenta(s) local(es) alcanza su valor máximo en agosto seguido por julio. En algunos casos, las altas presiones continentales y oceánicas que se reportan durante todo el año pueden generar brisotes fuertes (brisotazos) del primer cuadrante. Se han descrito valores de viento máximo por un fenómeno complejo como la acción conjunta de un anticiclón (al norte de Cuba) y de un organismo ciclónico tropical (al sur en el Mar Caribe). Existen casos de vientos máximos por trombas marinas en zonas costeras.

Las rachas o valores extremos de la rapidez del viento en Cuba, año por año, tienden a una distribución estadística según el modelo de Frechet y su caracterización según un modelo estadístico de este tipo, refleja la ocurrencia de determinados procesos meteorológicos de carácter estacional, particularmente, los huracanes. Los vientos máximos anuales se encuentran asociados a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos generadores de vientos muy fuertes. Para el estudio de sus causas, se hace necesario revisar la cronología de huracanes, los Estados Generales del Tiempo y mapas sinópticos que permitan caracterizar la velocidad máxima del viento en Cuba (Vega et al., 1998).

Debido a la posición geográfica de Cuba, las características de la circulación atmosférica y a la

configuración de la isla alargada de oeste a este, los fenómenos causantes de los vientos máximos anuales sufren una disminución desde la mitad occidental del territorio, hasta la mitad oriental, de manera tal, que en las provincias más orientales los vientos máximos ocurren en mayor grado por la acción de las tormentas locales severas, mientras que, en las provincias occidentales es más probable el efecto de los sistemas migratorios de la circulación atmosférica, tales como huracanes y sistemas frontales, entre otros.

El viento es un elemento del clima que es consecuencia de otro elemento: la presión atmosférica, la cual se define como el peso del aire a la altura Z . El viento es el flujo del aire que se origina por la diferencia de presión entre dos puntos: el aire se desplaza con menor o mayor rapidez en la dirección del gradiente de presión, o sea, en la dirección que corresponde a una disminución de la presión atmosférica. El viento se mide en metros por segundos (m/s), kilómetros por hora (km/h), millas por hora (mph) o nudos (kn): $1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h}$, $1 \text{ mph} \approx 1.609344 \text{ km/h}$, $1 \text{ kn} \approx 1.853248 \text{ km/h}$ y la dirección en la rosa de 8 o 16 rumbos, en grados sexagesimales: $10 = 60^\circ$ (minutos), $11 = 60^\circ$ (segundos).

La racha máxima (r_{max}) es el valor máximo absoluto de la velocidad del viento, la cual imprime un intervalo de pocos segundos en el anemograma (carta) del anemorumbógrafo tipo Dines que puede medir, mediante el principio de succión y presión del viento (tubo de Pitot), velocidades de hasta $360 \text{ km/h} = 100 \text{ m/s}$; cada carta tiene dos gráficos simultáneos en el tiempo: el cinemograma (velocidad del viento) y el rumbograma (dirección de donde sopla el viento). Por ejemplo: en la estación meteorológica (EM) de Casablanca, La Habana, se observó una racha máxima de $42.0 \text{ m/s} = 151 \text{ km/h}$, del S, a las 18:25 h del día 1 de septiembre de 1933 por un ciclón tropical (huracán), cruzando al norte hacia el Golfo de México.

En Cuba, los resultados obtenidos en estudios del viento máximo se realizan en base a la racha máxima anual, la cual es el pico extremo que alcanza la rapidez del viento en un tiempo dado, y

que, por lo general, es medible en un intervalo de tiempo que dura solo unos segundos. Caracterizar estadísticamente la variable viento máximo tiene una significativa importancia debido a su utilidad práctica. Las rachas de viento ocurren con una duración que varía desde 1 hasta 5 segundos. Por tanto a los efectos del estudio del viento máximo que poseen una duración media general de 3 segundos. En cuanto a la altura de medición de la racha máxima empleada se realizó de acuerdo con lo estandarizado por la OMM #8, Parte I, Capítulo 5, sección 5. 9. 2, que establece que la rapidez y la dirección del viento se mide a 10 metros sobre el nivel del terreno ([OMM, 2013](#)).

Es muy importante para el Instituto de Meteorología y en especial para el Centro del Clima tener una metodología para la obtención de los períodos de retorno de la variable meteorológica viento máximo, por lo que se han desarrollado herramientas computacionales a través de métodos estadísticos con los cuales podemos brindar servicios, obtener beneficios económicos y desarrollar una mejor investigación. El principal objetivo de este estudio es obtener una metodología de la variable meteorológica viento máximo que calcule los períodos de retorno, esto se aplicará en las estaciones meteorológicas del país que tengan un periodo de 30 años aproximadamente. Podremos obtener mediante el software TkHURS los periodos de retorno y el cálculo de las frecuencias estimadas de huracanes a través del ajuste de un Modelo de Poisson a la variable que cuenta el número de huracanes por año que han azotado. También a través del software SEVECLIM se obtienen los periodos de retorno de la variable de estudio a través de diferentes distribuciones de probabilidad para obtener el mejor modelo de ajuste a los datos y estimar los valores esperados de los períodos de retorno así como los principales estadígrafos ([Roura *et al.*, 2019a](#)).

MATERIALES Y MÉTODOS

En este epígrafe abordamos el origen y formato de los datos utilizados. Distribución de las

provincias y estaciones meteorológicas por regiones de peligro. Se comentó la metodología a emplear del software SEVECLIM. El viento en los huracanes, la utilización del TkHURS, su teoría y metodología. Se logró al final con estos dos software la metodología para el estudio del viento máximo.

Recopilación y preparación de la información

La primera tarea en un estudio climático-meteorológico, implica la recopilación de la información registrada u observada en estaciones meteorológicas, de manera que la red de observación posibilite realizar la evaluación y estimación de la distribución espacial y temporal de variables climáticas. La investigación climática requiere del conocimiento inicial de las condiciones físico-geográficas, datos puntuales medidos-observados, procesamiento, tratamiento y análisis de variables meteorológicas a los diferentes niveles: diario, mensual y anual. La elaboración de estudios meteorológicos sólo podrá ser efectuada cuando se tenga una base de datos consistente, completa, continua y extensa de las variables climáticas de interés ([Roura *et al.*, 2018a](#)).

Es importante destacar que, para realizar el estudio sobre series temporales de datos meteorológicos, estos deben ser continuos, es decir, no deben existir vacíos, huecos o lagunas de datos en la serie. En la mayoría de los registros de variables meteorológicas en estaciones, la información presenta vacíos en las diferentes escalas en los datos disponibles. Para estudiar períodos lo más extensos posible y para no perder información de algunos períodos debido a estos vacíos, se ha definido por conveniencia aplicar dos metodologías para el relleno, completamiento o en algún caso para la reconstrucción de las distintas variables estudiadas. Por consideraciones prácticas, el relleno de una serie de datos de una estación cualquiera se realiza tomando en cuenta a las estaciones geográficamente más cercanas, siempre y cuando esas estaciones tengan consistencia aceptable. Dentro de los criterios de rellenado tenemos el que se realiza entre estaciones cercanas

que pertenezcan al mismo grupo regional climático. En caso de que esto no sea posible, se deberá realizar un cuidadoso análisis para usar estaciones de otros grupos. Tener en cuenta que las series se rellenan, siempre que los datos faltantes no superen un período continuo de vacíos de tres temporadas o años. Recordar que las nuevas series rellenas y/o ampliadas deberán seguir el comportamiento original, lo cual se puede comprobar mediante la teoría de decisiones y/o el vector regional ([Roura et al., 2018a](#)).

La mayoría de los anemorrumbógrafos del tipo Dines en Cuba fueron instalados a partir de 1970 y solamente la estación meteorológica de Casablanca tiene una serie larga y confiable de rachas máximas anuales (estimadas o registradas), iniciada en 1909 y que es representativa de la región occidental de Cuba. El período de retorno de la velocidad máxima del viento en huracanes será referido a la racha máxima, que es el “valor pico” de la velocidad del viento registrado durante un intervalo de hasta de 10 segundos en un anemograma del tipo Dines (el cual trabaja por el principio de succión y presión del viento, con los que se han registrado rachas entre 300 y 360 kilómetros por hora). En la escala de Saffir-Simpson se utiliza el viento máximo sostenido (medio) en superficie en un intervalo de 1 minuto. La información de las 25 estaciones meteorológicas se obtuvo después de un largo estudio de la variable viento máximo teniendo en cuenta que tuviese al menos 30 años de datos con porcentajes bajos de datos faltantes, a los cuales le aplicamos los métodos estadísticos para su completamiento. Para su estudio con el software SEVECLIM se utilizó el formato .csv al cargar los datos. Para el estudio de los huracanes se usó la cronología de huracanes ([Pérez, 2013](#)) y el formatos .csv al cargarlo en el software TkHURS.

Distribución de las provincias y estaciones meteorológicas por regiones de peligro

El país se dividió en varias regiones en cuanto al viento máximo a través de un grupo de 25 estaciones meteorológicas con periodos superiores a los 30 años, seleccionadas de acuerdo a diferentes criterios: la longitud de las series de datos de

vientos máximos, la ubicación geográfica, los fenómenos que han afectado a la localidad y la magnitud de las rachas más intensas que se hayan registrado.

De acuerdo con la frecuencia de afectación por los huracanes, se subdividió el territorio de Cuba en cuatro regiones de peligro: Muy Alto Peligro (Pinar del Río, La Habana, Artemisa, Mayabeque e Isla de la Juventud), Alto Peligro (Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos), Moderado Peligro (Sancti Spiritus, Ciego de Ávila, Camagüey, Granma y Santiago de Cuba) y Bajo Peligro de afectación (Las Tunas, Holguín y Guantánamo). Las estaciones meteorológicas seleccionadas fueron agrupadas según la subdivisión del territorio nacional ([Pérez et al., 2001](#)), se distribuyeron a razón de siete en la región de Muy Alto Peligro, seis en la región de Alto Peligro, nueve en la región de Moderado Peligro y tres en la región de Bajo Peligro ([Tabla 3](#)).

Se muestra la estación de referencia por cada región de peligro que involucra las diferentes provincias, resultado del estudio del grupo de 16 estaciones ([Tabla 4](#)).

Metodología del Software SEVECLIM para el cálculo de períodos de retorno de la velocidad máxima anual del viento

Con la idea de facilitar el trabajo y eliminar errores a la hora de realizar los cálculos, se desarrolló una aplicación visual que permite a un usuario introducir los datos de alguna variable extrema y este le brinda el mejor modelo que ajusta los datos, la gráfica que corresponde a dicho modelo, los valores esperados para 10, 20, 50, 100 y otros años así como los principales estadígrafos de interés. La herramienta computacional que se presenta en este documento es una aplicación de nombre SEVECLIM.exe, desarrollada sobre la plataforma .NET y utilizando el lenguaje de programación C#. En la modelación estadística de los datos de una serie de observaciones de variables extremas con asimetría positiva o negativa, se utilizan distribuciones acumulativas teóricas biparamétricas $F(x) = p(X \leq x)$, como las de Frechet I, Gumbel I, Log-Normal entre otras.

Tabla 3. Distribución de las provincias y estaciones meteorológicas por regiones de peligro

Regiones de Peligro	Provincias	Estaciones meteorológicas seleccionadas
Muy Alto	Pinar del Río	Cabo de San Antonio
		Paso Real de San Diego
	La Habana	Casablanca
	Artemisa	Güira de Melena
	Mayabeque	Bainoa
Alto	Isla de la Juventud	La Fé
		Punta del Este
	Matanzas	Playa Girón
	Cienfuegos	Unión de Reyes
		Cienfuegos
Moderado	Villa Clara	Sagua la Grande
		El Yabú
		Caibarién
	Sancti Spiritus	Trinidad
	Ciego de Ávila	Sancti Spiritus
Bajo		Júcaro
		Nuevitas
	Camagüey	Palo Seco
		Camagüey
	Granma	Cabo Cruz
	Santiago de Cuba	Universidad
		Contramaestre
	Las Tunas	Puerto Padre
	Holguín	Velasco
	Guantánamo	Punta de Maisí

Mediante estas leyes de probabilidades (distribuciones acumulativas) se ajustaron los datos del viento máximo anual, utilizando las fórmulas de ploteo de Weibull, Beard, Cunnane y Hazen. El modelo de mejor ajuste corresponde al que tenga el mayor coeficiente de correlación por el método de variable reducida, el cual consiste en la transformación de los datos por logaritmicación neperiana reiterada de acuerdo al proceso de linealización de modelos teóricos exponenciales. La metodología propuesta en el software para el análisis de la caracterización de variables extremas tendrá en cuenta los siguientes pasos ([Roura et al., 2019a](#)):

PASO 1: Cargar los datos desde un fichero .csv o teclear los datos manualmente.

PASO 2: Seleccionar la opción según la variable extrema de interés (máxima o mínima).

PASO 3: Se muestra el esquema de cálculo en la aplicación del método de Variable Reducida con los datos ordenados de menor a mayor (x'_i), el rango de x'_i , las cuatro Distribuciones Acumulativas Empíricas (DAE), el logaritmo neperiano de x'_i y las cuatro variables reducidas en la DAE correspondiente. En el caso de la variable extrema máxima los cuatro valores de la inversa de la función normal acumulada en la DAE correspondiente.

PASO 4: Se observa en la tabla, la combinación de las DAE F_i y Distribución Acumulativa Teórica (DAT) F , asociado al coeficiente de correlación, error y gráfico correspondiente.

PASO 5: Se muestran los principales estadígrafos de interés para el análisis de la variable de estudio.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas representativas por regiones de peligro y por provincias

Regiones de Peligro	Estación representativa por región	Provincias	Estación representativa por provincia
Muy Alto	CASABLANCA	Pinar del Río	Cabo de San Antonio
		La Habana	Casablanca
		Artemisa	Güira de Melena
		Mayabeque	Bainoa
		Isla de la Juventud	Punta del Este
Alto	PLAYA GIRÓN	Matanzas	Playa Girón
		Cienfuegos	Cienfuegos
		Villa Clara	Caibarién
		Sancti Spíritus	Sancti Spíritus
		Ciego de Ávila	Júcaro
Moderado	CABO CRUZ	Camagüey	Nuevitas
		Granma	Cabo Cruz
		Santiago de Cuba	Contramaestre
		Las Tunas	Puerto Padre
		Holguín	Velasco
Bajo	VELASCO	Guantánamo	Punta de Maisí

PASO 6: Se muestran los valores asociados a un período de retorno calculado por la distribución con mayor coeficiente de correlación y menor error. La estimación de los parámetros de la ley ajustada por el método seleccionado, mostrando el gráfico de distribución y densidad.

PASO 7: Se guarda en un fichero .xls los datos del esquema de cálculo en la aplicación del método de Variable Reducida, la combinación de las DAE F_i y DAT F , los estadígrafos fundamentales, los valores asociados a un período de retorno para cada distribución y los parámetros de estimados por cada método.

Como resumen se ilustra gráficamente ([Figura 1](#)) la metodología utilizada en el software SEVECLIM.exe.

El viento en los huracanes

De todas las fuerzas destructivas del huracán, quizás la más conocida sean los fuertes vientos. Estos determinan, directa o indirectamente, la presencia y magnitud de otras fuerzas destructivas de la tormenta y resultan ser el principal índice de la intensidad del huracán. Con excepción de los tornados, los huracanes son los fenómenos

meteorológicos que presentan las mayores intensidades de viento. En ocasiones las rachas máximas sobrepasan los 300 Km/h. Los vientos asociados a los huracanes ocasionan daños importantes debido a la gran fuerza que ejercen sobre cualquier estructura. La fuerza que ejerce el viento es proporcional al cuadrado de su velocidad, de ahí se deriva que bastaría un viento de 140 Km/h para producir una fuerza dos veces superior a la que produciría un viento de 100 Km/h.

En los huracanes el viento gira alrededor del centro, en contra de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. Gran parte del área que es afectada por el paso de un huracán sufre fuertes vientos que rolan abruptamente hacia una dirección u otra en dependencia de la trayectoria del huracán. En aquella localidad sobre la que pasa el ojo se llega a sentir calma y puede ocurrir después un giro brusco de unos 180 grados.

Los vientos más fuertes (los vientos máximos sostenidos, promediados en un intervalo de 1 minuto) suelen estar localizados en la pared nubosa alrededor del ojo, a una distancia de aproximadamente 25 kilómetros del centro, la cual varía en dependencia del tamaño del ojo. De tal forma, la velocidad del viento en los huracanes decrece notablemente desde la zona donde se

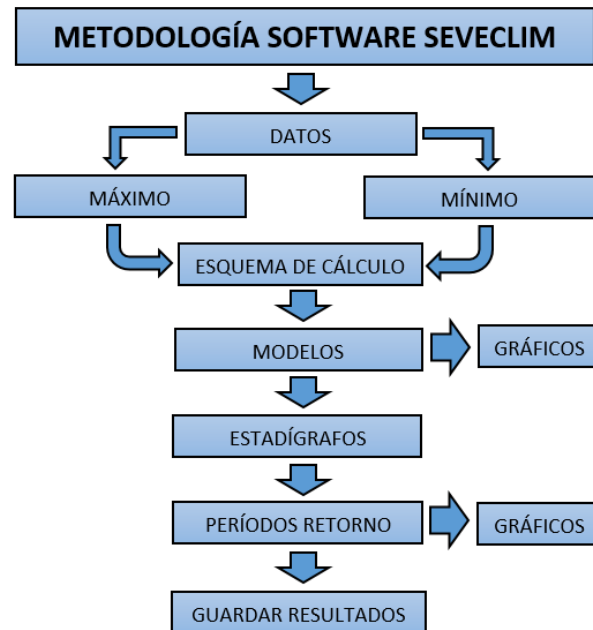


Figura 1. Metodología seguida en el software SEVECLIM.exe

localizan los vientos máximos hacia su periferia. El semicírculo derecho del huracán, con respecto a la dirección de su movimiento, se caracteriza por las velocidades más altas, siendo por tanto el huracán un fenómeno asimétrico. En la medida que el huracán se intensifica, los vientos máximos se localizan más cerca de su centro. En algunos huracanes de gran intensidad el viento máximo ha sido localizado a unos 10 kilómetros del centro. Sin embargo, en los huracanes maduros o en fase de debilitamiento los vientos máximos pueden encontrarse relativamente lejos del centro.

No todos los huracanes poseen un perfil de viento similar. En algunos, los vientos con fuerza de huracán se extienden sólo unas pocas decenas de kilómetros, mientras que en otros el área que dichos vientos ocupan es más extensa. En su interrelación con la superficie terrestre los huracanes pueden desorganizarse y debilitarse, principalmente si su trayectoria impacta regiones montañosas, como es el caso del Escambray y la Sierra Maestra. Los huracanes mayores tienden a decaer más lentamente que los pequeños, no obstante existen casos en que los vientos fuertes persisten por un período cercano a las 12 horas, o incluso durante más tiempo. Sin embargo, debido a

lo estrecho del territorio de Cuba, en muchas ocasiones los huracanes no se debilitan al cruzar por el territorio nacional ([Ballester et al., 2010](#); [Rubiera et al., 2006](#)).

La rafagiosidad del viento en los huracanes es muy grande, o sea, que existe una marcada diferencia entre la racha máxima y los vientos máximos sostenidos. Como regla general se tiene que la velocidad del viento en superficie será mayor sobre el océano que sobre tierra; pero la rafagiosidad será superior sobre tierra, especialmente en terrenos montañosos. Esto significa que la diferencia entre la racha máxima y los vientos máximos sostenidos se incrementa por los efectos de la superficie terrestre.

Otra variación importante de la velocidad del viento en los huracanes se produce en la vertical. Debe destacarse, que en los huracanes el viento se incrementa notablemente con la altura, tendencia que se mantiene hasta los 500 m (1665 ft) aproximadamente, y a una altura de 50 m (166.5 ft) puede registrarse una Categoría Saffir-Simpson inmediata superior a la observada en la superficie (a 10 m de altura).

Algunos huracanes se destacaron por los fuertes vientos producidos sobre Cuba. La racha máxima

registrada en nuestro país hasta el presente es la producida por el huracán Fox en octubre de 1952, con 280 Km/h en Cayo Guano del Este. Otro registro de interés es la racha máxima producida por el Huracán de 1944, ascendente a 262 Km/h en Casablanca. Sin embargo, algunos otros huracanes intensos pudieron producir rachas máximas aún superiores debido a las presiones mínimas registradas y los daños observados a su paso. Para el caso del huracán de 1926, fue estimada una racha máxima de 288 Km/h en Casablanca. Estimaciones de grandes rachas pueden observarse en los huracanes de 1846, 1910, 1917, 1924, y 1932 que en Camagüey se sintieron los efectos del huracán categoría 5 de “Santa Cruz del Sur”. Recientemente, el huracán Dennis de julio del 2005, produjo una racha de 238 Km/h en la estación meteorológica de Cabo Cruz, provincia Granma, antes de que la torre del anemorumbógrafo fuese derribada por la intensidad del viento. Rachas superiores pudieron sentirse en las zonas de los municipios Niquero y Pílon que fueron afectadas por el semicírculo derecho de Dennis (Pérez et al., 2001; Rubiera et al., 2006; Ballester et al., 2010). Otros como el huracán “Mathew” categoría 4 en 2016 fue el primero de gran intensidad que afectó la provincia de Guantánamo, según la información histórica de 228 años, así como en Camagüey y Ciego de Ávila el huracán categoría 5 “Irma” en 2017.

Metodología del Software TkHURS para el cálculo de periodos de retorno de huracanes

Los más grandes desastres naturales que recoge la historia de nuestro país han estado asociados a los ciclones tropicales. La gran actividad ciclónica ocurrida en los últimos años, ha centrado la atención sobre la climatología de estos, su variabilidad y su tendencia a largo plazo. Varios huracanes han ocasionado desastres de gran significación debidos, fundamentalmente al número de personas que murieron como consecuencia del impacto de la tormenta. De acuerdo a la trayectoria revisada de huracanes que azotaron a la Isla de Cuba y/o mares circundantes, el territorio de la República de Cuba presenta

diferencias sensibles relativas a las afectaciones, por lo que se decidió hacer un software para obtener los periodos de retorno y calcular las frecuencias estimadas a través del ajuste de un Modelo de Poisson a la variable que cuenta el número de huracanes por año que han azotado a Cuba, en el periodo de 1791-2018, a partir de la Cronología de los Ciclones Tropicales y los Estados Generales del Tiempo (Roura et al., 2018b).

Con la idea de facilitar el trabajo y eliminar errores a la hora de realizar los cálculos, esta aplicación visual permite a un usuario introducir la cronología de huracanes, brinda una serie de aplicación desarrollada para filtrar los datos en distintas cronologías de huracanes en Cuba, por región o por provincia y apreciar distintos análisis de los mismos para definir los periodos de retorno de huracanes a través del modelo de Poisson con el objetivo de agilizar y obtener rápidamente la información. La herramienta computacional que se presenta es una aplicación de nombre TkHURS.exe, desarrollada sobre la plataforma .NET y utilizando el lenguaje de programación C#.

Para el cálculo de los periodos de retorno de los huracanes a través del Software TkHURS a nivel de provincia, de región y país, se ha seleccionado la Distribución de Poisson:

$$P(x) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} = P(X = x) \text{ donde } x = 0, 1, 2, \dots (4)$$

Media:

$$E(x) = \lambda \quad (5)$$

Varianza:

$$V(x) = \lambda \quad (6)$$

Fórmula de recurrencia:

$$P(x) = \left(\frac{\lambda}{x}\right) * P(x-1) \text{ donde } x = 1, 2, \dots (7)$$

Ahora:

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{\sum x * f}{\sum f} \quad (8)$$

Si $\hat{P}_0, \hat{P}_1, \dots, \hat{P}_k$ son las probabilidades relativas a los sucesos $x = 0, x = 1, \dots, x = k$ entonces definimos:

El periodo de retorno $\hat{T}_k$:

$$\hat{Q}_k = \sum_{j=0}^k \hat{P}_j; \hat{Q}_0 = \hat{P}_0, \hat{Q}_1 = \hat{P}_0 + \hat{P}_1, \dots, \hat{Q}_k = \hat{P}_0 + \hat{P}_1 + \dots + \hat{P}_k \quad (9)$$

$$\hat{T}_k = \begin{cases} \frac{1}{\hat{Q}_k} & \text{si } \hat{Q}_k < 0.5 \\ \frac{1}{1 - \hat{Q}_k - 1} & \text{si } \hat{Q}_k > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

Interpretación: Estamos trabajando con una serie anual. Si $\hat{Q}_2 = \hat{P}_0 + \hat{P}_1 + \hat{P}_2 = 0.01005 < 0.5$ entonces

$$\hat{T}_2 = \frac{1}{0.01005} = 99.5$$

El suceso $X \leq 2$ tiene período de retorno promedio igual a 99.5 años. Si $\hat{Q}_5 < 0.5$, el $\hat{Q}_6 = 0.50957 > 0.5$ no se puede calcular, entonces para calcular el $\hat{Q}_7 = 0.72661$ luego el suceso $X \geq 7$ tiene un período de retorno promedio igual a $\hat{T}_k = \frac{1}{1 - \hat{Q}_6 - 1} = \frac{1}{1 - 0.5097} = 2.04$ años (Roura *et al.*, 2018b).

La metodología propuesta en el software para el análisis del cálculo de los periodos de retorno de los huracanes tendrá en cuenta los siguientes pasos:

PASO 1: En Archivo, Cargar Cronología: se cargan los datos desde un fichero .csv.

PASO 2: En Mostrar, Cronología General: se muestra la tabla de toda la información.

PASO 3: En Años: se define el año de inicio y final.

PASO 4: En Categoría: se elige una o varias categorías de los huracanes.

PASO 5: En Región: se elige la provincia, la región o Cuba en general.

PASO 6: Una vez realizados los pasos 3, 4 y 5, en Mostrar, Cronología Filtrada: se muestra la información con la que se desea hacer el análisis.

PASO 7: En Mostrar, Huracanes/Categoría: se muestra la tabla del conteo de Huracanes por Categorías en la escala de Saffir-Simpson.

PASO 8: En Mostrar, Huracanes al Año/Categoría: se muestra la tabla del conteo de cuántas veces han ocurrido cierta cantidad de huracanes al año de cada una de las categorías según la escala de Saffir-Simpson.

PASO 9: En Mostrar, Períodos de Retorno: se muestran varias informaciones de interés como la frecuencia observada y esperada del número de huracanes y lo más importante los valores del período de retorno de cada cantidad específica de huracanes por año. Se muestra el cálculo de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

PASO 10: En Mostrar, Meses/Categorías: se puede observar el conteo de los huracanes por mes y categoría. Muestra la cantidad de huracanes de los tres meses más activos (agosto, septiembre y octubre) y la cantidad de huracanes intensos (categorías 3, 4 y 5 en la escala de Saffir-Simpson).

PASO 11: En Guardar Cambios: se puede guardar cualquier cambio que se realice en la misma vista de la aplicación, creando un nuevo fichero que se puede guardar con el nombre deseado.

PASO 12: En Leyenda: esta pestaña se encarga, solamente, de proporcionar una leyenda sobre la simbología usada en la aplicación en general para una mayor comprensión.

PASO 13: En la pantalla se pueden observar la cantidad de huracanes y el período de tiempo que se va a usar en el estudio deseado.

PASO 14: En Archivo, Guardar tablas: se guarda en un fichero .xls los datos con los cuales se han realizado el análisis (Cronología General, Cronología Filtrada, Huracanes/Categoría, Huracanes Al Año/Categoría, Períodos de Retorno y Meses/Categoría).

Como resumen se ilustra gráficamente (Figura 2) la metodología utilizada en el software TkHURS.exe.

Metodología para fuertes vientos

Con el objetivo de facilitar el trabajo del investigador, hemos utilizado dos herramientas, que contribuyen a la metodología de fuertes vientos. La cual tendrán en cuenta los siguientes pasos:

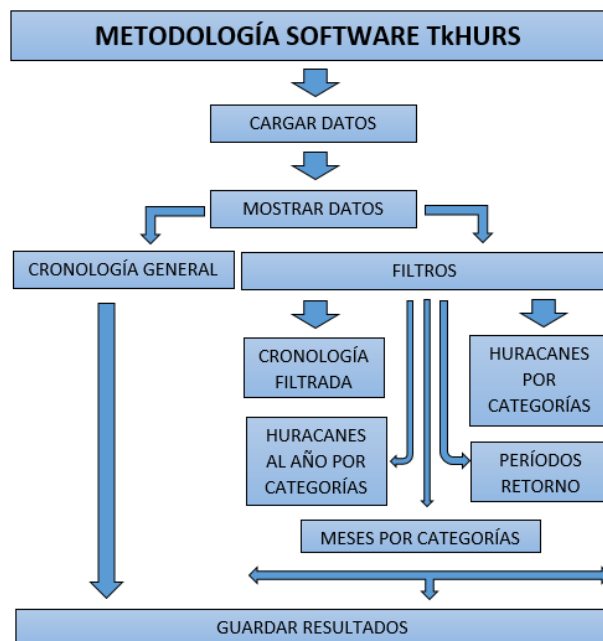


Figura 2. Metodología seguida en el software TkHURS.exe

PASO 1. Selección de las estaciones meteorológicas (Provincia, Región o Cuba).

1.1 Tener presente los diferentes criterios:

- Longitud de la serie de datos de viento máximo.
- Ubicación geográfica.
- Fenómenos que han afectado a la localidad.
- Magnitud de las rachas de viento más intensas registradas.

PASO 2. Obtención de las series de datos del viento máximo anual, las cuales tienen que ser:

- Consistentes, completas, continuas y extensas (mínimo 30 años).

PASO 3. Clasificación según el peligro de acuerdo a la frecuencia de afectación por huracanes.

- Muy Alto.
- Alto.
- Moderado.
- Bajo.

PASO 4. Utilización del software SEVECLIM para obtener:

4.1 Modelo de mejor ajuste (Combinación de la Distribución Teórica conjuntamente con la distribución acumulativa, asociada al coeficiente de correlación y el error estándar).

4.2 Principales estadígrafos de interés para el análisis de la variable.

4.3 Método de mayor eficiencia.

4.4 Parámetros de la ley ajustada por el método seleccionado.

4.5 Períodos de retorno que se deseen analizar.

4.6 Ecuación del modelo.

PASO 5. Utilización del software TkHURS para obtener mediante el análisis de la cronología de huracanes:

5.1 Número de huracanes que han afectado (Provincia, región o Cuba).

5.2 Probabilidad de afectación de al menos un huracán al año.

5.3 Período de retorno de al menos un huracán al año.

5.4 Número de huracanes intensos que han afectado (Provincia, región o Cuba).

5.5 Probabilidad de afectación de al menos un huracán intenso al año.

5.6 Período de retorno de al menos un huracán intenso al año.

5.7 Número de huracanes de gran intensidad que han afectado (Provincia, región o Cuba).

5.8 Probabilidad de afectación de al menos un huracán de gran intensidad al año.

5.9 Período de retorno de al menos un huracán de gran intensidad al año.

5.10 Ecuación del modelo.

PASO 6. Análisis conjunto del experto.

Como resumen se ilustra gráficamente la metodología utilizada para fuertes vientos ([Figura 3](#)).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección veremos los resultados arrojados por la clasificación del peligro por regiones. Se obtuvieron los valores estimados de las rachas máximas anuales del viento en cada una de las estaciones representativas de los diferentes peligros, llegando a obtener un modelo que se ajusta en cada caso a través de una distribución teórica. Así como las probabilidades y períodos de

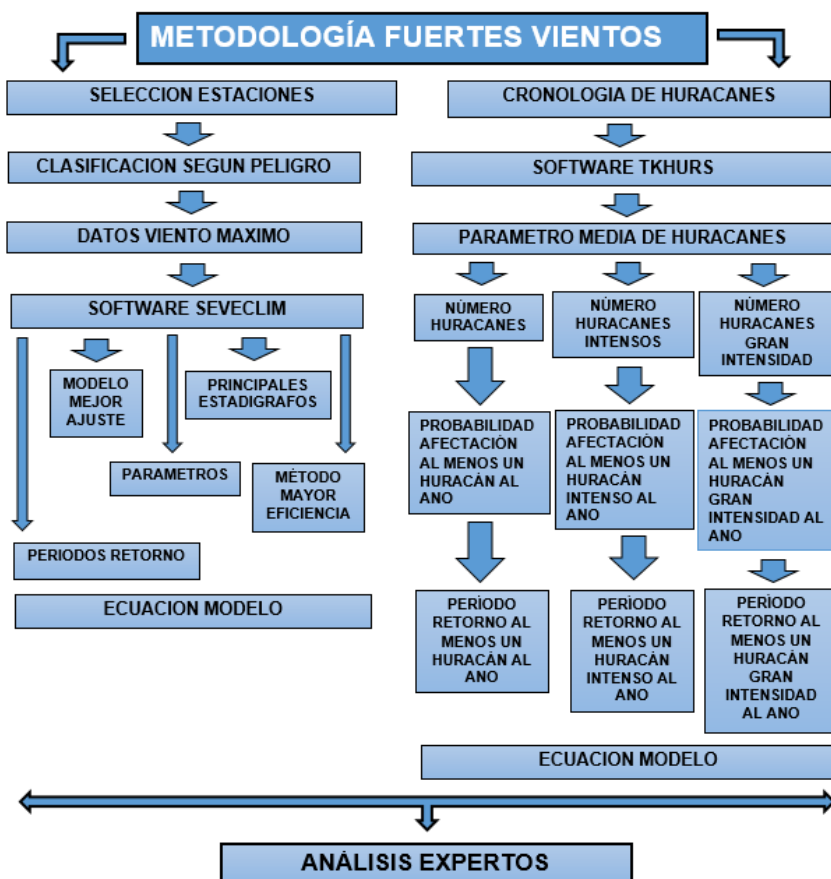


Figura 3. Metodología de fuertes vientos

retorno de la afectación de huracanes de las provincias.

Clasificación del peligro por regiones de la velocidad máxima anual del viento

La estación meteorológica de Casablanca (23010 'N, 82021' W) sobre una colina a 50 metros de altura, municipio Regla, La Habana, perteneciente al Instituto de Meteorología, es la única del país que, permaneciendo activa, posee series completas de datos observacionales desde abril de 1908, incluyendo datos de rachas máximas (observadas y estimadas). Sobre la base de los datos de rachas máximas anuales registradas o estimadas durante el período 1909-2017, la más confiable y de mayor longitud de Cuba, se calculó el mejor modelo de ajuste de las rachas máximas, resultando los períodos de retorno (Tabla 5). Esta estimación resulta representativa para todo el territorio de la región de muy alto peligro de afectación por huracanes.

* Principales rachas máximas, registradas o estimadas, ocurridas en la región de alto y muy alto peligro: fueron medidos 340 Km/h en Paso Real de San Diego en 2008, fueron medidos 280 Km/h en Cayo Guano del Este en 1952, fueron medidos 262 Km/h en Casablanca en 1944, fue estimada físicamente 340 Km/h en las inmediaciones de La Habana en 1846, fue estimada físicamente 340 Km/h en la porción más occidental de Pinar del Río en 1924, fue estimada físicamente 325 Km/h en la porción occidental de Pinar del Río en 1910, fue estimada físicamente 320 Km/h en Nueva Gerona

en 1917, fue estimada físicamente 288 Km/h en Casablanca en 1926.

Luego de procesar estos datos, se determinó que las rachas máximas anuales de Casablanca se ajustan a un modelo de una distribución teórica de Frechet I con parámetros $\alpha=26.6$ y $\beta=5.7$, cuya fórmula de ploteo de la distribución acumulativa empírica de Hazen (método de variable reducida con coeficiente de correlación $r = 0.98$) es la siguiente:

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{-\beta}} = p(X \leq x) = F(x) = e^{-\left(\frac{x}{26.6}\right)^{-5.7}} \quad (11)$$

Estos resultados se interpretan de la siguiente manera, por ejemplo, una vez cada 100 años (como promedio) se puede esperar en Casablanca una racha máxima de (al menos) 215 kilómetros por hora (Km/h) o 59.6 metros por segundo (m/s). Es preciso mencionar que la “estabilidad” del método de Frechet se ha verificado a partir de un extremo inicial fijo (dato de 1909) y con un paso de 5 años, a partir de la ocurrencia del huracán de gran intensidad (SS4) en La Habana de octubre de 1926, donde la racha máxima (estimada) alcanzó el valor de 80.0 m/s (288 km/h).

La estación meteorológica de Playa Girón de la provincia de Matanzas, durante el período 1974-2017. Se calculó el mejor modelo de ajuste de las rachas máximas, resultando los períodos de retorno (Tabla 6).

Luego de procesar estos datos, se determinó que las rachas máximas anuales de Playa Girón se ajustan a un modelo de una distribución teórica Gumbel I con parámetros $\alpha=22.0$ y $\beta=5.6$, cuya

Tabla 5. Valores estimados (límites inferiores) de la racha máxima anual del viento en la estación de Casablanca representativa de la región de muy alto peligro, para distintas probabilidades y períodos de retorno (1909 - 2017)

Racha máxima del viento* (Km/h)	Racha máxima del viento* (m/s)	Probabilidad (%)	Período retorno (años)
125	34.7	20	5
142	39.4	10	10
161	44.7	5	20
168	46.7	4	25
190 - 214	52.8 - 59.6	2	50
215 - 288	59.7 - 80.0	1	100

fórmula de ploteo de la distribución acumulativa empírica de Hazen (método de variable reducida con coeficiente de correlación $r = 0.96$) es la siguiente:

$$F(x) = e^{-e\left[-\left(\frac{x-22.0}{5.6}\right)\right]} \quad (12)$$

Estos resultados se interpretan de la siguiente manera, por ejemplo, una vez cada 100 años (como promedio) se puede esperar en Playa Girón una racha máxima de (al menos) 171 Km/h o 47.5 m/s. Sobre la base de los datos de rachas máximas anuales registradas o estimadas durante el período 1976-2017 (42 años) en la estación meteorológica de Cabo Cruz, Granma, se calculó el mejor modelo de ajuste de las rachas máximas, resultando los períodos de retorno (Tabla 7). Esta estimación resulta representativa para todo el territorio de la región de moderado peligro de afectación por huracanes. Tiene la ventaja de incluir en su serie histórica la racha máxima de 239 km/h, producida

por el huracán categoría 4 Dennis del 2005, poco antes de que se produjera el derribo de la torre del anemorumbógrafo.

Región de peligro moderado según la estación meteorológica de referencia Cabo Cruz, se muestran los diferentes períodos de retorno (Tabla 3.1.3). Luego de procesar estos datos, se determinó que las rachas máximas anuales del modelo de mejor ajuste a la variable racha máxima anual en el período 1976-2017, resultó ser el de Frechet I con parámetros $\alpha=22.2$ y $\beta=5.3$, cuya fórmula de ploteo de la distribución acumulativa empírica de Weibull (método de variable reducida con coeficiente de correlación $r = 0.98$) es la siguiente:

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x}{22.2}\right)^{-5.3}} \quad (13)$$

Estos resultados se interpretan de la siguiente manera, por ejemplo, una vez cada 100 años (como promedio) podemos inferir con un nivel de significación del 5% y se puede esperar en Cabo

Tabla 6. Valores estimados (límites inferiores) de la racha máxima anual del viento en la estación de Playa Girón representativa de la región de alto peligro, para distintas probabilidades y períodos de retorno (1974- 2017)

Racha máxima del viento* (Km/h)	Racha máxima del viento* (m/s)	Probabilidad (%)	Período retorno (años)
109	30.3	20	5
124	34.4	10	10
139	38.6	5	20
143	39.7	4	25
157	43.6	2	50
171 - 194	47.5 - 53.9	1	100

Tabla 7. Valores estimados (límites inferiores) de la racha máxima anual del viento en la estación de Cabo Cruz (representativa de la región de moderado peligro de Cuba, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila, Camagüey, Granma y Santiago de Cuba), para distintas probabilidades y períodos de retorno (1976 - 2017)

Racha máxima del viento* (Km/h)	Racha máxima del viento* (m/s)	Probabilidad (%)	Período retorno (años)
106	29.4	20	5
122	33.9	10	10
140	38.9	5	20
146	40.6	4	25
166	46.1	2	50
190	52.8	1	100

* Principales rachas máximas, registradas o estimadas, ocurridas en la región de moderado peligro: fueron medidos 239 Km/h en Cabo Cruz en 2005.

Cruz una racha máxima de (al menos) 190 Km/h o 52.8 m/s. Sobre la base de los datos de las rachas máximas anuales registradas o estimadas durante el período 1976-2017 (42 años) en la estación meteorológica de Velasco, provincia de Holguín, se calculó el modelo de mejor ajuste de las rachas máximas, resultando los periodos de retorno (Tabla 8). Esta estimación resulta representativa para todo el territorio de la región de bajo peligro de afectación por huracanes que tiene la ventaja de la inclusión del valor de 185 Km/h, registrados por el huracán Ike en septiembre de 2008.

Región de peligro bajo según la estación meteorológica de referencia Velasco (período 1976-2017). Luego de procesar estos datos, se determinó que las rachas máximas anuales se ajustan a un modelo de una distribución teórica Log-Normal con parámetros $\alpha=23.6$ y $\beta=0.3$, cuya fórmula de ploteo de la distribución acumulativa empírica de Hazen (método de variable reducida con coeficiente de correlación $r = 0.99$) es la siguiente:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt = P(X \leq x) = \bar{N}\left(\frac{\ln x - 23.6}{0.3}\right) \quad (14)$$

Y la función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\beta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} = \frac{1}{0.3x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - 23.6}{0.3}\right)^2} \quad (15)$$

Se puede inferir con un nivel de significación del 5% que en el lugar de referencia se puede esperar una racha máxima de 149 y 160 km/h cada 50 y 100 años como promedio, respectivamente.

Probabilidades y periodos de retorno de la afectación de las provincias de Cuba por los huracanes

Los periodos de retorno fueron calculados a través del ajuste de un modelo de Poisson a la variable aleatoria X que cuenta el número de huracanes por año que han azotado a cada una de las provincias y en general al país. Una vez obtenida la cantidad de años y huracanes, se busca la frecuencia de huracanes por año, se calcula la probabilidad de ocurrencia mediante la fórmula de recurrencia para así obtener la frecuencia esperada, la cual debe ser muy similar a la frecuencia observada para que se puedan obtener buenos resultados. Luego se calcula el acumulado de las probabilidades y así se obtiene el período de retorno.

En la actualidad se denomina a los huracanes de las categorías 3, 4 y 5 como “huracanes intensos”. Los huracanes de las categorías 4 y 5 pueden denominarse “como los huracanes más intensos” o de “gran intensidad”. Se muestra la probabilidad anual y el período de retorno de que cada provincia, región y país sea afectada por al menos un huracán de cualquier intensidad (Tabla 9). Para

Tabla 8. Valores estimados (límites inferiores) de la racha máxima anual del viento en la estación de Velasco (representativa de la región de bajo peligro de Cuba (Las Tunas, Holguín y Guantánamo), para distintas probabilidades y periodos de retorno (1976 - 2017)

Racha máxima del viento (Km/h)	Racha máxima del viento* (m/s)	Probabilidad (%)	Período retorno (años)
107	29.7	20	5
121	33.6	10	10
133	36.9	5	20
137	38.1	4	25
149	41.4	2	50
160 - 185	44.4 - 51.4	1	100

* Principales rachas máximas, registradas o estimadas, ocurridas en la región de moderado peligro: fueron medidos 220 Km/h en Punta Lucrecia en 1963, al salir al mar el huracán Flora, y 185 Km/h generado por el huracán Ike en septiembre del 2008.

su confección se ha utilizado el período 1791-2018, tomando en consideración que los huracanes son un fenómeno de baja frecuencia y requieren de una larga serie histórica para realizar un análisis riguroso de su comportamiento climático.

Como puede apreciarse, las provincias de Artemisa y Pinar del Río, así como el municipio especial de la Isla de la Juventud poseen la mayor probabilidad mientras que, las provincias Las Tunas, Santiago de Cuba y Guantánamo poseen las probabilidades más bajas. De forma general, la probabilidad disminuye considerablemente desde Camagüey hacia el Este. Para huracanes intensos las provincias comprendidas entre Pinar del Río y Matanzas, incluyendo la Isla de la Juventud, presentan los periodos de retornos más bajos. Dichos períodos se incrementan desde Cienfuegos hacia el Este notablemente, con la existencia de varias provincias las cuales no han sido afectadas por huracanes intensos de forma directa. El huracán Dennis fue el primero de categoría 4 que afectó la provincia de Granma, así como el huracán Mathew fue el primero de categoría 4 que afectó la provincia de Guantánamo, según la información histórica de 228 años. En Camagüey se sintieron los efectos del huracán categoría 5 de “Santa Cruz del Sur” en 1932. Así como en Camagüey y Ciego de Ávila huracán categoría 5 “Irma” en 2017.

Es de destacar que el concepto de período de retorno no significa que existan ciclos en la actividad de huracanes sobre Cuba. De hecho, como ejemplo podemos tomar la provincia de La Habana, la que presenta un período de retorno de 58 años para los huracanes de gran intensidad pero, fue afectada en 1844 y 1846 por huracanes de dicha categoría (con sólo dos años entre uno y otro) y en 1926 y 1944 (17 años entre ellos). Por el contrario, desde 1944 no se han sentido los efectos de un huracán categoría 4 o 5. Como otras condiciones climáticas extremas, los ciclones tropicales presentan grandes variaciones de diferentes escalas temporales, no sólo en el número sino también en la intensidad y localización de los que se forman. Los cambios a gran escala que ocurren en la circulación oceánica y atmosférica ejercen una sustancial influencia en la actividad de

cada temporada ciclónica del Atlántico Norte. Así se observan períodos de alta y baja actividad ciclónica, que se alternan a lo largo del tiempo.

En la afectación de los huracanes a Cuba se observan variaciones de diferentes escalas de tiempo. Períodos de mayor y menor actividad se intercalan a lo largo de los años. Durante los 100 años más activos, comprendidos entre 1870 y 1969, se produjeron períodos de extraordinaria actividad y otros de poca actividad.

Durante el período comprendido entre los años 1970 y 2000 el país transitó por una relativa tranquilidad, ya que sólo fue afectado por cinco huracanes (tres SS1 y dos SS2 de la Saffir - Simpson), aunque enfrentó, además, situaciones muy adversas con tormentas tropicales muy lluviosas. Desde 1995 se ha producido un notable incremento de la actividad ciclónica en el área del océano Atlántico. Dicho incremento ha incidido sobre Cuba principalmente desde el año 2001, de tal forma que, entre el 2001 y el 2018 nuestro país fue afectado por doce huracanes. Lo más notable de estos últimos 18 años ha sido la ocurrencia de tres huracanes intensos (SS3 de la Saffir - Simpson) y siete huracanes de gran intensidad (seis SS4 y uno SS5 de la Saffir - Simpson). Es indudable que dicha cifra representa la ocurrencia de una gran actividad ciclónica sobre Cuba, la que por el momento no es posible prever cuándo terminará.

Como resultados de aplicar el software TkHURS se obtuvo que en el período de 1791-2018 ([Tabla 9](#)), Cuba fue afectada por 116 huracanes con una probabilidad de afectación de la menos 1 huracán al año de 30.6 % y un período de retorno de 2.5 años como promedio. Ocurrieron 34 huracanes intensos con un período de retorno de al menos 1 al año de 7.2 años como promedio y 18 huracanes de gran intensidad con un período de retorno de al menos 1 al año de 13.2 años como promedio. En el período de 1791-2018, Occidente fue afectada por 81 huracanes con una probabilidad de afectación de al menos 1 huracán al año de 24.9 % y un período de retorno de 3.3 años como promedio. Ocurrieron 25 huracanes intensos con un período de retorno de al menos 1 al año de 9.6 años como promedio y 13

Tabla 9. Porcientos de probabilidades y períodos de retorno de la afectación de al menos un huracán al año a cada provincia de Cuba y al municipio especial Isla de la Juventud (1791-2018; 228 años)

1791-2018	Número huracanes	Probabilidad afectación al menos un huracán al año (%)	Período retorno al menos un huracán al año	Número huracanes intensos	Período retorno al menos un huracán intenso al año	Número huracanes gran intensidad	Período retorno al menos un huracán gran intensidad al año
Pinar del Río	51	17.9	5.0	12	19.5	7	33.1
Isla de la Juventud	61	20.5	4.3	11	21.2	6	38.5
La Habana	45	16.2	5.6	11	21.2	4	57.5
Artemisa	52	18.2	4.9	14	16.8	6	38.5
Mayabeque	46	16.5	5.5	9	25.8	4	57.5
Matanzas	47	16.8	5.4	11	21.2	4	57.5
Cienfuegos	45	16.2	5.6	6	38.5	2	114.5
Villa Clara	43	15.6	5.8	6	38.5	1	228.5
Sancti Spiritus	39	14.4	6.4	4	57.5	1	228.5
Ciego de Ávila	33	12.5	7.4	4	57.5	1	228.5
Camagüey	33	12.5	7.4	4	57.5	2	114.5
Las Tunas	27	10.5	9	1	228.5	0	---
Granma	33	12.5	7.4	1	228.5	1	228.5
Holguín	33	12.5	7.4	2	114.5	1	228.5
Santiago de Cuba	30	11.5	8.1	1	228.5	0	---
Guantánamo	32	12.2	7.6	1	228.5	1	228.5
TOTAL DEL PAIS	116	30.6	2.5	34	7.2	18	13.2
Occidente	81	24.9	3.3	25	9.6	13	18.0
Centro	60	20.5	4.3	13	18.0	4	57.5
Oriente	43	15.6	5.8	4	57.5	3	76.5

*Huracán intenso comprende las categorías 3, 4 y 5 de la escala Saffir-Simpson. Huracán de gran intensidad comprende solo las categorías 4 y 5.

huracanes de gran intensidad con un período de retorno de al menos 1al año de 18.0 años como promedio. En el período de 1791-2018, Centro fue afectada por 60 huracanes con una probabilidad de afectación de la menos 1 huracán al año de 20.5 % y un período de retorno de 4.3 años como promedio. Ocurrieron 13 huracanes intensos con un período de retorno de al menos 1al año de 18.0 años como promedio y 4 huracanes de gran intensidad con un período de retorno de al menos 1al año de 57.5 años como promedio. En el período de 1791-2018, Oriente fue afectada por 46

huracanes con una probabilidad de afectación de la menos 1 huracán al año de 15.6 % y un período de retorno de 5.8 años como promedio. Ocurrieron 4 huracanes intensos con un período de retorno de al menos 1al año de 57.5 años como promedio y 3 huracanes de gran intensidad con un período de retorno de al menos 1al año de 76.5 años como promedio. En el período de 1791-2018, las provincias más afectadas por huracanes fueron Artemisa con 52 con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 4.9 años como promedio y Pinar del Río con 51 con un período de

retorno de al menos 1 huracán al año de 5.0 años como promedio, pero el municipio especial de la Isla de la Juventud es el más afectado con 61 huracanes con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 4.3 años como promedio. En el período de 1791-2018, las provincias más afectadas por huracanes intensos fueron Artemisa con 14 con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 16.8 años como promedio y Pinar del Río con 12 con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 19.5 años como promedio, así como el municipio especial de la Isla de la Juventud, La Habana y Matanzas con 11 huracanes con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 21.2 años como promedio. En el período de 1791-2018, las provincias más afectadas por huracanes de gran intensidad fueron Pinar del Río con 7, un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 33.1 años como promedio, Artemisa y el municipio especial de la Isla de la Juventud con 6 huracanes con un período de retorno de al menos 1 huracán al año de 38.5 años como promedio.

CONCLUSIONES

Cuba es un país afectado frecuentemente por huracanes. El peligro de afectación se divide en cuatro y tiene una estación meteorológica representativa por peligro. Con el software SEVECLIM se comprobó usando los datos del viento máximo anual, que la estación meteorológica de Casablanca (1909-2017), representativa de la región de muy alto peligro, una vez cada 100 años puede esperar una racha máxima entre 215 y 288 Km/h. La “estabilidad” del método de Frechet I conjuntamente con Hazen se debe a la ocurrencia del huracán de gran intensidad en La Habana de octubre de 1926. Playa Girón (1974-2017), representativa de la región de alto peligro, una vez cada 100 años se puede esperar una racha máxima entre 171 y 194 Km/h, ajustándose a un modelo de Gumbel I conjuntamente con Hazen. Cabo Cruz (1976-2017), representativa de la región de moderado peligro, una vez cada 100 años se puede esperar una racha máxima de al menos 190 Km/h, ajustándose a un

modelo de Frechet I conjuntamente con Weibull. Velasco (1976-2017), representativa de la región de bajo peligro, una vez cada 100 años se puede esperar una racha máxima entre 160 y 185 Km/h, ajustándose a un modelo Log-Normal conjuntamente con Hazen. Con el software TkHURS se pudo comprobar que en el período de 1791-2018 Cuba fue afectada por 116 huracanes con una probabilidad de afectación de la menos un huracán al año de 30.6 y un período de retorno de 2.5 años como promedio. Hubo 34 huracanes intensos con un período de retorno de al menos 1 al año de 7.2 años como promedio y 18 huracanes de gran intensidad con un período de retorno de al menos 1 al año de 13.2 años como promedio. Con la utilización de los dos software SEVECLIM y TkHURS se obtuvo la metodología para el peligro por fuertes vientos, con la cual el especialista obtendrá los resultados deseados.

RECOMENDACIONES

Este estudio tuvo en cuenta las series históricas de los vientos registrados hasta el año 2017, será conveniente la realización de una nueva actualización en el futuro cercano. Mientras tanto, lo expresado en este artículo mantiene su actualidad, entre otras razones porque se tomó como representativa de cada región las estaciones que tuvieran los registros de la racha máxima anual más altas, entre otras consideraciones. Utilizar la metodología del peligro por fuerte vientos en todos los Centros Meteorológicos Provinciales (CMP) del país. Independientemente que existen varias formas de obtener los períodos de retorno se recomienda hacer uso del software SEVECLIM para la variable extrema viento y del software TkHURS para el análisis relacionado con los huracanes.

REFERENCIAS

- Ballester, M., González, C., y Pérez, R. (2010). Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico. Editorial R. Carreiro, La Habana, Cuba.

- OMM. (2013). Programa de ciclones tropicales. Informe OMM/DT- N° 494, Ginebra Suiza.
- 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., Vega, R. y Limia, M. (2001). Los huracanes más intensos y desastrosos de Cuba en los últimos dos siglos. Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba [en línea], Volumen 7, No. 2, Art 3-1, enero 2001, [Consulta 26 septiembre 2016], Disponible en internet: http://www.insmet.cu/sometcuba/boletin/v07_n01/espanol/art_3-1.htm
- Roura, P., Sistachs, V. y Vega, R. (2018 a). Modelos Probabilísticos para caracterizar la lluvia total máxima en 24 horas. Revista: Métodos Cuantitativos Aplicados, de la serie Métodos Cuantitativos Aplicados, Tomo1, No.1, pp. 60-71, 2018, ISBN: 978 607 9440 36 7.
- Roura, P., Sistachs, V., Vega, R. y Alpizar, M. (2018 b). Caracterización estadística climatológica de huracanes en cuba durante el período 1791-2016. Revista Cubana de Meteorología, Vol.24, No.3, pp. 304-312, 2018, ISSN: 0864-151X.
- Roura, P., Rodríguez, J., Sistachs, V. y Vega, R. (2019 a). SEVECLIM: software para analizar modelos probabilísticos para caracterizar variables climáticas extremas. Revista Investigación Operacional, VOL. 40, No.1, pp. 92-103, 2019, ISSN: 0257-4306.
- Roura, P., Sistachs, V., Vega, R. e Izquierdo, D. (2019 b). La Habana, "Ciudad Maravilla" su historia desde la Meteorología a 500 años de su fundación. Revista Cubana de Meteorología , VOL. 25, No.3, pp. 481-490, septiembre-diciembre 2019, ISSN: 2664-0880.
- Rubiera, J., González, C., Ballester, M., Llanes, M., Caymares, A., Gimeno, Y. y Mojena, E. (2006). Curso sobre Ciclones Tropicales. Editorial Academia, La Habana, Cuba, 32 pp.
- Vega, R., Limia, M. y Garcés, M. (1998). Evaluación de los fenómenos meteorológicos que provocan fuertes vientos, lluvias intensas y penetraciones del mar en la zona de la terminal de contenedores de Ciudad de La Habana. Informe científico técnico, Instituto de Meteorología, La Habana, pp. 15.