

PROBABILIDAD DE CAÍDA DE GRANIZOS SOBRE CUBA

Mario Carnesoltas Calvo
Instituto de Meteorología, Cuba. mario.carnesoltas@insmet.cu

Rocío García Castillo
Instituto de Meteorología, Cuba. alis.varela@insmet.cu

Yanmichel Morfa Avalos
Instituto de Meteorología, Cuba. yanmichel.morfa@insmet.cu

Resumen

Se presenta la estrecha relación encontrada entre la diferencia de altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo y la de los 1000 hPa, y el espesor de la capa entre los niveles de 500 y 1000 hPa, en la determinación de la probabilidad de la caída de granizos bajo las condiciones del trópico insular. Dicha relación de espesores estuvo en función de la altura geopotencial, y de los valores de la temperatura y del contenido de humedad de la capa donde se encontraba ubicada cada día dicha isoterma, aumentando la probabilidad entre más baja fuese su relación. En la muestra seleccionada de varios años se encontró un mejor resultado con una aproximación de funciones lineal, en comparación con la cuadrática, ya que ambas presentaron una correlación mayor de 0.99. Se muestra el algoritmo utilizado como pos - procesamiento, partiendo de las variables de salida de los modelos de pronóstico numérico disponible, y dos ejemplos en los que pueden apreciarse, en el primero, el valor de probabilidad de la caída de granizos relacionado con cada tormenta pronosticada para un periodo y zona dada, mientras que en el segundo, un caso de no probabilidad de caída de granizos. Ambos ejemplos se comparan con las imágenes desde el satélite meteorológico a la hora más próxima que se pronosticó por el modelo numérico, así como el reporte recibido desde el lugar.

Hail Fall Probability over Cuba

Abstract

The narrow relation of the height difference between the wet bulb 0°C isotherm and that at 1000 hPa and the thickness of the layer between 200 and 1000 hPa with the probability of hail fall under the conditions of the insular tropic is presented. This relation of thicknesses stood as a function of the geopotential height, the temperature values and the moisture content of the layer upon which this isotherm is placed, with the probability increasing for lower values of the relation. For the selected sample of several years, a better result was obtained with linear functions approximation, as compared with quadratic, since both yielded correlations of 0.99. The algorithm used as post processing of available numerical outputs is shown together with an example in which the probability value of hail fall, related with each forecasted storm for a given time and zone can be appreciated, and is compared with satellite images at the closest time to the numerical model forecast, as well as local reports.

Introducción

“En la ciencias de la TLS se recomienda avanzar en dos direcciones principales: en lograr encontrar mejores parámetros de pronósticos y en perfeccionar los modelos numéricos de pronósticos para la convección severa” (Doswell III y Schultz, 2006). Esto es correcto, pero además, puede plantearse una tercera línea de desarrollo para este propósito que es, en definitiva, la que se propone y emplea en el presente resultado: “utilizar la salida de las variables pronosticadas por un modelo numérico mejorado y adecuado a las condiciones de cada región, como valores de entrada en un procedimiento que diagnostique la ocurrencia o no de una determinada manifestación de severidad local”. En el análisis de la literatura especializada para diferentes condiciones locales, pueden encontrarse muchos de los factores que cada autor encontró o considera que intervienen en la ocurrencia del tiempo severo. Si de ellos se eliminan los

que corresponden a otras latitudes, se adecuan sus valores manteniendo unidades con sentido físico y meteorológico, se podrá apreciar que, para las condiciones del trópico insular donde se encuentra Cuba, dichos factores pueden enmarcarse en tres grupos y ser tratados como las “condiciones necesarias” para la ocurrencia de la severidad local, mientras que la “condición suficiente” sería la ocurrencia espacio – temporal de las tres necesarias para una región dada.

Carnesoltas et al. (2013), plantearon que la primera condición es el suficiente contenido de humedad en la capa 1000 – 700 hPa. Esta condición garantiza la “materia prima” para formar una gran nube de tormenta y contribuye a la inestabilidad de los niveles bajos. La segunda condición es el suministro estable y suficiente de calor a la Capa Fronteriza Atmosférica (CFA). Esta condición es la que determina las estructuras y características de los procesos que intervienen en inicio de la convección profunda, genera la nube de tormenta y la que aprovecha las condiciones del entorno para concentrar la energía en un espacio relativamente reducido (en la nube creada). La tercera condición consiste en una determinada combinación de factores en los niveles medios y altos que provocan la liberación de la energía acumulada en la tormenta. Si la liberación de dicha energía se produce en un intervalo relativamente corto de tiempo, y a su vez, en un espacio relativamente pequeño, ocurrirá un evento de los considerado “localmente severo”. Por el contrario, si la energía se libera lentamente, la tormenta se disipará sin que se presente evento severo. También esta condición es la que determina la forma en que se va a liberar dicha energía, o sea, el tipo de severidad a ocurrir.

En la investigación realizada se tomaron en cuenta los elementos para la ocurrencia de caída de granizos, tanto en las publicaciones consultadas, como los resultados obtenidos en Cuba hasta el momento. A continuación se exponen las características principales del evento “caída de granizos” considerado severo en la mayoría de los Servicios Meteorológicos, en especial cuando alcanzan grandes dimensiones.

Fawbush y Miller (1953), propusieron un método para el pronóstico de las dimensiones de los granizos en la superficie terrestre. Foster y Bates (1956), propusieron técnicas para pronosticar las dimensiones de los granizos. Papas (1962), planteó una técnica simple para el pronóstico de la caída o no de granizos, a partir de la altura del nivel de 0 °C, considerándole como el nivel de congelación. Frisby y Samsom (1967), investigaron sobre la incidencia de los granizos en los trópicos. Griffith (1970), examinó la altura del 0 °C del bulbo húmedo como un parámetro en el pronóstico de granizos en Italia. Se ha comprobado, a través de experimentos de laboratorio (<http://weatherfaqs.org.uk>), que “estas formas parecen ser función de la temperatura. Como la temperatura en el interior de una nube que contiene cristales de hielo varía en algunos grados, esta debe ser la razón de que las formas finales de los cristales pueden ser muy complejas”. Nelson (1983), investigó el tamaño de los granizos en tormentas superceldas mediante radar doppler en varios estudios de casos. Planteó que “en las superceldas el factor más crítico para el crecimiento del granizo no era donde la corriente ascendente era máxima, sino en los valores moderados, entre 20 y 40 m/s”. Johns y Doswell III (1992), explicaron el trabajo operativo que se realizaba en esa década en los Estados Unidos para el pronóstico de tormentas severas, en particular la caída de grandes piedras de granizos. Gilmore y Wicker (1998), plantearon que el aire más seco que llega por advección a los niveles medios puede incrementar la DCAPE en estos niveles. Y que autores anteriores, como Brancato (1942) y Rasmussen (1994), sugirieron que el descenso se produce a partir del nivel de mínimo de θ_w en los niveles medios. Fawbush y Miller (1954) sugirieron el descenso a lo largo de la curva θ_w desde el nivel de w_bz . Foster (1958) sugirió el descenso desde los 5 km sobre tierra a lo largo de la curva media de θ_w calculada por el mezclamiento de los niveles medios y el aire de la capa fronteriza. Stull (2015),

A partir del año 2002, en el marco del proyecto “Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de Tormentas Locales Severas en Cuba. Un esquema para su predicción” (Aguilar et al., 2005, 2009), se decidió encaminar las investigaciones hacia cada tipo de severidad por separado, entre ellas la caída de granizos bajo las condiciones del trópico insular. Martínez (2008), incluyó las tormentas que provocaron caída de granizos y su relación con la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo. En su trabajo evidenció la estrecha correlación entre los días con granizo y la altura de esta isoterma, sin embargo el carácter de este trabajo fue aún local debido a los escasos sondeos aerológicos disponibles. Posteriormente, Fernández

(2010) incluyó los gradientes verticales de temperatura y de humedad en la capa 1000 - 700 hPa, y tomó en cuenta (<http://weatherfaqs.org.uk>), que “las gotas de agua usualmente predominan a temperaturas mayores a $-20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que los cristales de hielo son centros más eficientes para el crecimiento desde la fase de vapor; lo que se debe a que la diferencia entre el valor de la tensión de saturación del vapor sobre una superficie de hielo es menor que sobre una superficie de agua. En las nubes heterogéneas el aire está más cercano a la saturación con respecto al agua líquida, pero está super - saturado (una fase inestable) respecto al hielo. Los cristales de hielo crecen desde la fase de vapor mucho más rápidamente que cuando están cerca de gotas y pueden adoptar una gran variedad de formas. Esto se conoce usualmente como el proceso de Bergeron – Findeisen”.

Una de las variables que debe tenerse en cuenta es la temperatura del aire que rodea al granizo en su caída, si es muy alta lo podría derretir antes de que llegue a la superficie. De modo similar, mientras más húmedo sea el medio, con más facilidad se va a saturar respecto al vapor de agua a medida que asciende, produciéndose así las gotas de agua super enfriadas. Y entre más cantidad de estas gotas se encuentren dentro de la nube será más probable que sean colectadas por el embrión de granizo que cae. Así, la otra variable tomada en cuenta fue el contenido de humedad en la capa 1000 - 700 hPa.

Por otra parte, si una gota de agua cae a través de una capa de aire que tiene una temperatura de bulbo húmedo constante, la gota de agua eventualmente alcanzará una temperatura igual a la temperatura del bulbo húmedo del aire. Esta es la razón por la que Miller y McGinley (1977) plantearon que “la altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo es la altura mínima a la que el granizo puede caer sin derretirse apreciablemente, después de darle oportunidad al enfriamiento evaporativo de la piedra”. Cuando estos autores hablan de las piedras de granizo, se refieren a los granizos de grandes dimensiones.

La temperatura del bulbo húmedo también fue investigada por Martínez (2009) en Camagüey, quien mostró que el 92.8% de los días con reporte de caída de granizos, la altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo se ubicó a una altura superior a 3500 m.

En general, en la mayoría de la literatura se pueden observar dos aspectos fundamentales: primero, la insistencia de los autores en el papel que juega la altura de la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la temperatura del bulbo húmedo en la ocurrencia del evento “caída de granizos”, y segundo, como era de esperar, la gran cantidad de investigaciones que se han dedicado al pronóstico de los granizos de gran tamaño, ya que son los que causan los mayores daños, incluso la muerte por impacto directo, pero no a los de pequeñas dimensiones.

Los objetivos fundamentales de la investigación fueron los siguientes: Analizar las características que presenta la altura de la isoterma 0°C de la temperatura del bulbo húmedo sobre Cuba; Encontrar las relaciones entre las variables que determinan la caída de granizos; Implementar y evaluar un procedimiento para calcular la probabilidad de caída de granizos; y Mostrar un pronóstico con las zonas de probabilidad de la caída de granizos a partir de las variables de salida de un modelo numérico.

2. Materiales y Métodos empleados

2.1 Datos utilizados

Las variables humedad relativa, altura geopotencial y temperatura en los niveles 500, 700, 850 y 1000 hPa, en el periodo de 1985 hasta el 2013, se obtuvieron de los datos diarios de la *Climatic Research Unit* (CRU) http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/qs_eurasia/daily/. La malla descargada del servidor de la CRU comprende el hemisferio norte con una resolución de 2.5° , por lo tanto, para calcular las variables se escogieron sólo aquellos puntos que por su cercanía a Cuba resultaban útiles. En la figura 2.1 se muestran los puntos seleccionados encerrados en círculos.

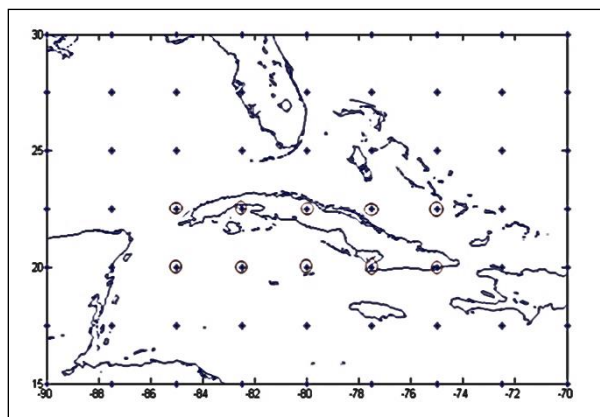


Fig. 2.1. Nodos seleccionados de la rejilla alrededor de Cuba utilizados en el cálculo de las variables para la caída de granizos.

2.2 Selección de los reportes de la Base de Datos del INSMET

El INSMET cuenta con una Base de Datos que recoge la cronología elaborada por Alfonso (1994), con la actualización realizada en el seno de los Proyectos sobre TLS, donde están registrados los reportes de todos los tipos de severidad desde el año 1980 hasta el 2011, en este caso la caída de granizos. La Base de Datos está organizada por hora, día, mes, año, período de ocurrencia, lugar de ocurrencia, provincia, fenómeno, fuentes y notas. De ella se seleccionaron los tres años con mayor cantidad de reportes, los que resultaron ser 1986, 1989 y 2011, y que suman 376 reportes de todo el país (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Cantidad de reportes de TLS por año en la Base de Datos del INSMET.

Año	No. de reportes	Año	No. de reportes	Año	No. de reportes
1980	56	1991	64	2002	34
1981	53	1992	50	2003	78
1982	49	1993	47	2004	62
1983	95	1994	38	2005	60
1984	67	1995	54	2006	39
1985	84	1996	35	2007	34
1986	163	1997	37	2008	75
1987	58	1998	41	2009	61
1988	54	1999	84	2010	36
1989	112	2000	59	2011	101
1990	61	2001	30		

2.3. Procedimiento empleado

2.3.1. Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se llevó a cabo un análisis crítico de todos los materiales disponibles y los factores o elementos significativos que intervienen en la ocurrencia de la caída de granizos. De los encontrados que constituían verdaderos aportes, se seleccionaron, ordenaron y adecuaron, eliminando los que no eran aplicables a las condiciones del trópico insular. A partir de estos elementos, se probaron varias relaciones entre las variables independientes hasta encontrar las apropiadas para ser utilizadas como expresiones de diagnóstico, y además, que cumplieran los requisitos exigidos para ser empleadas a la salida de un modelo numérico. La comprobación de la expresión analítica obtenida se llevó a cabo con la muestra seleccionada que se explicó en el párrafo anterior, o sea, igual cantidad de días con ocurrencia y de no ocurrencia. Finalmente, se exponen dos días independientes como ejemplos de casos empleando el modelo numérico.

2.3.2. Determinación de la Altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo

La determinación de la altura de la isoterma de 0°C de la temperatura del bulbo húmedo (*wbz* por sus siglas en inglés), se llevó a cabo calculando primeramente la temperatura del bulbo húmedo (t_w) en cada nivel de presión. En el cálculo de t_w se empleó la fórmula lineal propuesta por Carnesoltas (2017), ya que García (2016) comprobó que se obtenían los mismos valores que si se utilizaba el método iterativo que parte de la ecuación de Clausius - Clapeyron, derivada y resuelta por el procedimiento iterativo de Newton – Raphson. La fórmula lineal (2.1) resultó más eficiente computacionalmente que el método iterativo, pues sólo depende de la temperatura t y de la temperatura del punto de rocío t_d :

$$t_w = t - (0.0121t + 0.2305)(t - t_d) \quad (2.1)$$

En el cálculo de la temperatura del punto de rocío se utilizó la expresión:

$$t_d = \frac{b \log_{10} \left(\frac{e}{6.105} \right)}{a - \log_{10} \left(\frac{e}{6.105} \right)} \quad (2.2)$$

$$a = 7.5 \quad y \quad b = 237.3 \quad (t \geq 0) \quad \quad a = 9.5 \quad y \quad b = 265.5 \quad (t < 0)$$

Donde e es la tensión del vapor de agua, determinada por

$$e = \left(\frac{HR}{100} \right) e_s \quad (2.3)$$

La tensión del vapor de agua saturada será:

$$e_s = q_{VS} (0.62197 + q_{VS} / 0.62197) \quad (2.4)$$

Mientras que para la razón de mezcla q_{VS} se utilizó la fórmula de Teten:

$$q_{VS} = \frac{3.8}{p} \exp \left[a_w \frac{T - 273.159}{T - b_w} \right] \quad (2.5)$$

En la cual los valores de a_w y b_w dependen de la temperatura como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores de a_w y b_w en función de la temperatura.

a_w	b_w (K)	T (K)
17.270	35.5	≥ 273.159
21.875	7.5	< 273.159

Una vez calculada la temperatura del bulbo húmedo por (2.1), se procedió a calcular *wbz* mediante una interpolación lineal entre los niveles de 500 hPa y 700 hPa ó 700 hPa y 850 hPa, en dependencia del nivel donde se encontrara la isoterma de 0°C de la temperatura del bulbo húmedo:

$$wbz = h_{inf} + (h_{sup} - h_{inf}) \left[\frac{t_{W(inf)}}{t_{W(inf)} - t_{W(sup)}} \right] \quad (2.6)$$

Donde h_{sup} y h_{inf} son las alturas de los niveles inmediatamente por encima y por debajo del nivel donde la t_W cambia de signo, o sea, cuando $t_{W(inf)} \geq 0$ y $t_{W(sup)} < 0$.

2.3.3. Relaciones entre las variables que pueden influir en la caída de granizos

De las relaciones probadas por García (2016), la relación denominada R_1 resultó ser la que discriminaba con mayor claridad el evento. La relación es la siguiente:

$$R_1 = \left[\frac{h_5 - wbz}{h_5 - h_{10}} \right] \quad (2.7)$$

Donde h_{10} y h_5 son las alturas de los niveles de 1000 hPa y 500 hPa respectivamente. En la figura 2.2 se muestra un esquema representativo de la razón R_1 .

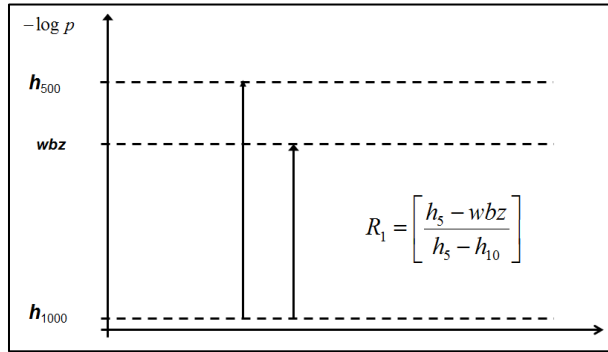


Fig. 2.2. Esquema representativo de la razón R_1 .

Carnesoltas et al. (2013), propusieron una función de probabilidad de ocurrencia de caída de granizo a partir de una variable diagnóstico combinada, que aunque tenía en cuenta factores físicos que determinan la formación y ocurrencia de la caída de granizo y mostró resultados aceptables, contenía dos términos estadísticos: la diferencia promedio de la cizalladura vertical del viento entre los niveles de 500 y 1000 hPa y la $w bz$ promedio. Pero esta característica tenía la desventaja de complejizar su cálculo computacionalmente. Tanto en el cálculo anterior como el que se presenta aquí, todas las variables se calcularon para las coordenadas más cercanas a la ubicación de la tormenta, para el día del año numerados en orden consecutivo desde 1 (1ro. de enero) hasta 365 (31 de diciembre), sin tener en cuenta los días 29 de febrero de los años bisiestos. García (2016) encontró que sólo la (2.7) y dividida por $w bz$, era la expresión por la que se lograba una función prácticamente lineal, esto es:

$$R_1 (w bz)^{-1} = \left[\frac{h_5 - w bz}{h_5 - h_{10}} \right] (w bz)^{-1} \quad (2.8)$$

O sea, una función cuadrática. Sin embargo, ya que los parámetros a y b siempre son positivos en el problema que se trata de resolver, así como los valores del estrecho rango en el que oscila $w bz$ en la atmósfera, las correlaciones obtenidas por una función lineal ($R^2= 0.9961$) y una cuadrática ($R^2= 0.9935$), resultaron semejantes y ambas pueden considerarse aceptables. La ventaja de utilizar la función de aproximación lineal en vez de la cuadrática, no es sólo por su simplicidad, sino que posee verdadero sentido físico y no estadístico, es independiente del tiempo y de las coordenadas donde ocurra el evento, y además, con ella se logra el mayor índice de efectividad del procedimiento, como se mostrará en la verificación de los eventos pronosticados.

2.3.4. Cálculo de la función de probabilidad de ocurrencia de caída de granizo

Los valores de cada variable que se consideraron de interés en la caída de granizos se calcularon para cada lugar de ubicación de la tormenta, interpolando mediante spline cúbico a partir de todos los nodos de la malla. Con este método se logró un resultado similar al promediar por provincias (Fernández, 2010), requiriendo solamente ahora el uso de polinomios de tercer grado, evitando así oscilaciones indeseables.

En el procesamiento de toda la información se empleó el lenguaje de programación Python 2.7.

3. Análisis y Discusión de los resultados

3.1 Principales características de la altura de la isoterma 0 °C del bulbo húmedo

En condiciones de latitudes medias (Gilmore y Wicker, 1998), la altura de $w bz$ se encuentra, en general, entre 2140 – 3210 m y está asociada a la caída potencial de granizos grandes hasta la superficie. Los valores de $w bz$ son solamente una guía general para la potencial caída de granizos, sólo predice el potencial de granizos grandes debido a que no considera la intensidad de la corriente ascendente o trayectoria de la parcela.

Las condiciones para la caída de granizos sobre Cuba, al igual que para otros eventos, no se presentan cada año de la misma forma ni con la misma frecuencia. Esto se puede apreciar en la figura 3.2 (confeccionada a partir de la tabla 2.1).

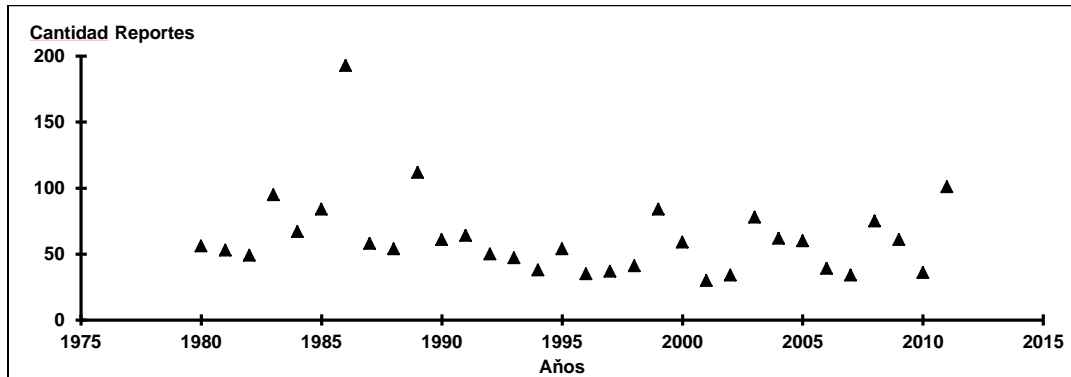


Fig. 3.1. Cantidad de reportes de caída de granizos entre 1980 y 2011 (base de datos INSMET).

En la figura 3.1 se puede apreciar que en los años de 1986, 1989 y 2011 se recibieron más cantidad de reportes, y si se compara esta cantidad con wbz media (fig. 3.2), se podrá apreciar en general, que la cantidad de reportes aumentó en los años en los que wbz era menor.

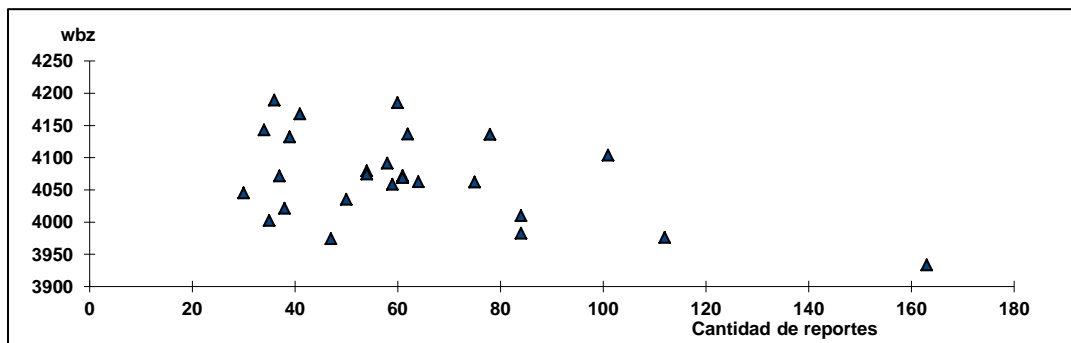


Fig. 3.2. Cantidad de reportes de caída de granizos (1985 – 2011) y la altura del 0 °C del bulbo húmedo (base de datos INSMET).

El hecho de tomar el periodo de 29 años (1985 – 2013), que es prácticamente de la misma extensión que el investigado por Fernández (2011) con 28 años (1980 – 2007), no cambió sustancialmente los resultados, puesto que el comportamiento de las diferentes curvas (wbz media y su desviación estándar), para todos los puntos (x, y) de la rejilla, mostraron regularidad en función del día J con un ciclo anual sin observarse fluctuaciones de mayor frecuencia.

En la figura 3.3 se puede distinguir con claridad la transición del periodo poco lluvioso (noviembre – abril) al periodo lluvioso (mayo – octubre), mientras que la transición opuesta no está tan bien definida. El primer periodo de transición se caracteriza por un pequeño salto en los valores de wbz , y a partir de aquí, una disminución de su desviación estándar. Los valores mayores de la wbz (se encuentra más alta), se presentan durante el periodo lluvioso, con desviaciones estándar que oscilan menos que en el periodo poco lluvioso.

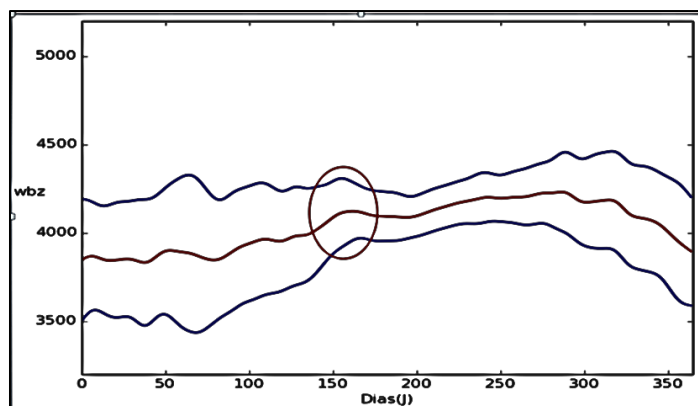


Fig. 3.3. Comportamiento de wbz con sus correspondientes desviaciones estándar, para un punto de la rejilla ubicado sobre la región occidental de Cuba (1985 – 2013).

Es necesario aclarar que, aunque los valores menores de wbz contribuyen a que los granizos alcancen la superficie de la tierra sin derretirse totalmente, el valor de su altura no determina por sí solo que ocurra el evento, puesto que su altura depende de la época del año y de la latitud del lugar. Por lo que se requirió entonces relacionarla con otras tres variables independientes en la capa en la que se genera y desarrolla esta forma particular del agua sólida. Esas variables fueron: la altura de la capa, su temperatura y su contenido de humedad. Así, al correlacionarlas adecuadamente se logró una expresión cuasi-lineal que refleja una realidad física.

3.2 Relaciones entre las variables que determinan la caída de granizos

Durante el análisis de las variables, la razón (2.8) resultó ser la que discriminaba con mayor claridad el evento caída de granizos. Debe aclararse que con la razón (2.7) no se pretende construir nuevos índices termodinámicos, sino que su propósito es sólo encontrar relaciones de variables que tengan significación con la ocurrencia del evento “caída de granizos”.

En la figura 3.4 se aparecen el comportamientos temporal de la wbz , tanto los días con reportes como los días sin reportes de caída de granizos, en las que se incluyeron como ejemplo los 163 casos correspondientes al año 1986. Este año es uno de los que se tomó como referencia ya que posee suficiente cantidad de reportes del total de años seleccionados.

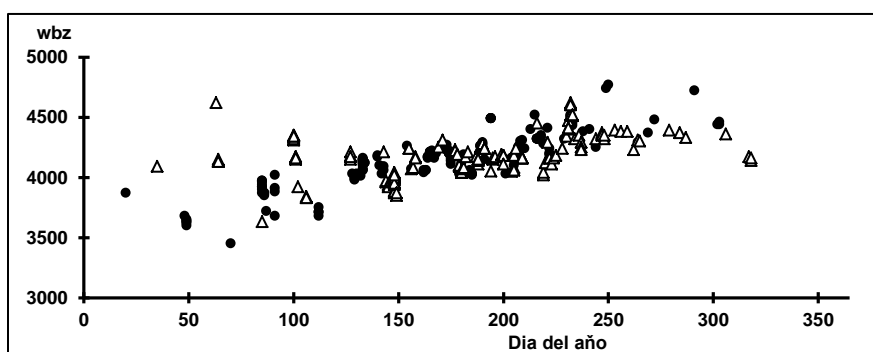


Fig. 3.4. Comportamiento temporal de la wbz durante 1986. Con círculos los días con reportes de caída de granizos y con triángulos los días sin reportes de caída de granizos.

En la figura 3.4 se puede apreciar que el comportamiento anual de la wbz no permite discriminar unos casos de otros, ya que, tanto los días con granizos como los días sin caída de granizos poseen valores de alturas semejantes. Sin embargo, cuando a la (2.8) se le calculó una aproximación de funciones con los mismos casos con reportes de granizos de los años 1986, 1989 y 2011 (figura 3.6), se obtuvo la regresión lineal (3.1) con una correlación $R^2 = 0.9961$.

$$hgr = -0.000167wbz + 1.0737 \quad (3.1)$$

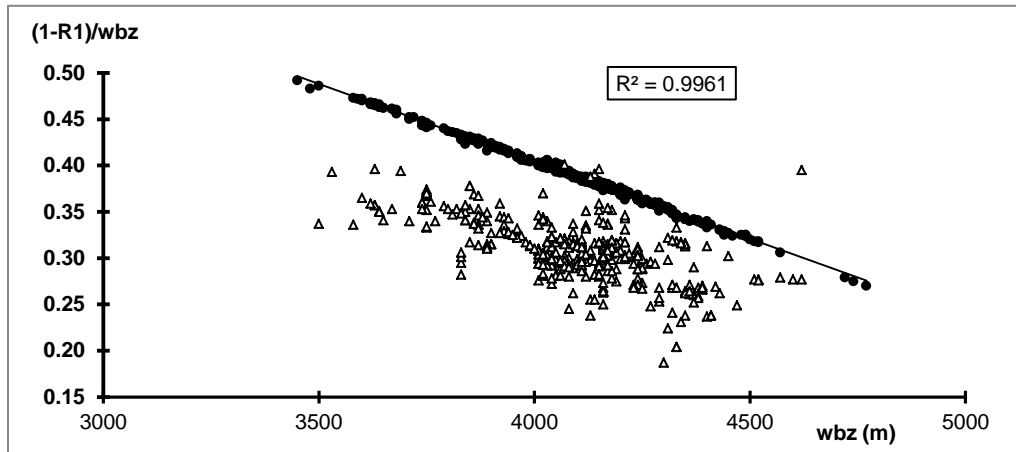


Fig. 3.5. Diagrama de dispersión de la razón $hgr = R_1/wbz$ obtenida mediante el ajuste lineal (3.2), de los 752 casos con granizos de los años 1986,1989 y 2011. Con círculos los días con reportes de caída de granizos y con triángulos los días sin reportes de caída de granizos.

En la figura 3.5 se muestra el diagrama de dispersión de la razón $hgr = R_1/wbz$ obtenida mediante el ajuste lineal (3.2), de los 752 casos con granizos de los años 1986,1989 y 2011. En ella se puede apreciar con claridad el agrupamiento ($R^2 = 0.9961$), que se logra de los casos de caída de granizos, de los casos en que no se recibió ningún reporte de ocurrencia del evento.

3.3 Procedimiento para calcular la probabilidad de caída de granizos

El procedimiento para calcular la probabilidad de caída de granizos consiste en ejecutar una secuencia de las fórmulas (2.5) – (2.1), luego las (3.1) y (3.2), siguiendo el orden que se muestra en el anexo 1. Para ello sólo falta fundamentar una función de probabilidad que responda a la distribución que presenten los datos procesados, y que además sea capaz de discriminar eficientemente las condiciones para que ocurra el evento, de las no favorables para que no ocurra el evento. Con este propósito se analizó la densidad estimada por Kernel de la razón entre R_1 y la wbz , según la expresión (2.8) de los años 1986, 1989 y 2011. Se puede apreciar (figura 3.6), los casos con reportes de granizos presentaron una distribución de densidad normal centrada prácticamente en cero.

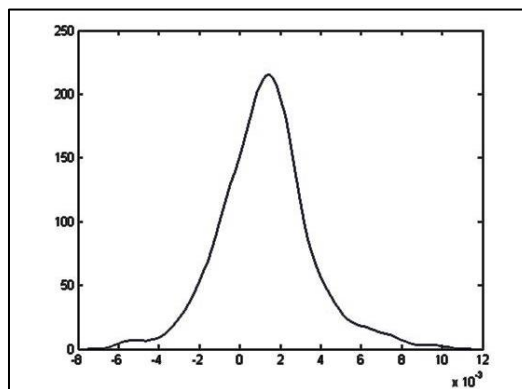


Fig. 3.6. Densidad estimada por Kernel de la diferencia entre la expresión (3.2) para todos los casos de los años 1986, 1989 y 2011.

El resultado de este análisis valida el empleo de una distribución exponencial para determinar la probabilidad de la caída de granizos P_G (%), a partir de tomar la razón negativa entre la diferencia al cuadrado de (2.8) y (3.1) y dividirla por su correspondiente varianza, esto es:

$$P_G(\%) = 100 \exp \left[- \frac{(hgr - wbz)^2}{k_3 \sigma^2} \right] \quad (3.2)$$

donde σ^2 es la varianza del cuadrado de las diferencias entre $(hgr - wbz)^2$ calculada a partir de la línea de regresión lineal (3.1), y k_3 es una constante empírica para lograr el mejor ajuste a una $P_G(\%) \geq 60\%$, de manera que todos los valores del conjunto $(hgr - wbz)^2$ de los días que ocurre el evento se encuentren siempre dentro de los límites de dicha varianza y superior a 60%, mientras que los valores del conjunto $(hgr - wbz)^2$ de los días que no ocurra el evento, se encuentren fuera de los límites de la varianza y con probabilidades menores al 60%.

Otro aspecto a tener en cuenta es el hecho que la función (3.1) considera el cumplimiento de las condiciones favorables para la caída de granizos en la capa entre los 1000 y los 500 hPa, o sea, si se cumple la 3ra. condición para la ocurrencia del evento, pero no tiene en cuenta el desarrollo de una nube de tormenta en la región donde se cumple dicha condición en los niveles medios (Carnesoltas, 2013). En el epígrafe 3.4 se mostrará una solución con el empleo de un modelo numérico de pronóstico y su verificación con las imágenes desde el satélite meteorológico.

3.3.1 Evaluación del pronóstico no probabilístico obtenido con el procedimiento

Con el objetivo de verificar la capacidad de predicción de (3.2) “probabilidad de caída de granizos”, calculada mediante la función de aproximación lineal (3.1), con la muestra de 376 días de ocurrencia por reportes y 376 días sin reportes de caída de granizos en las mismas coordenadas, se calcularon los atributos escalares fundamentales que caracterizan una tabla de contingencia de 2x2 (Wilks, 2006).

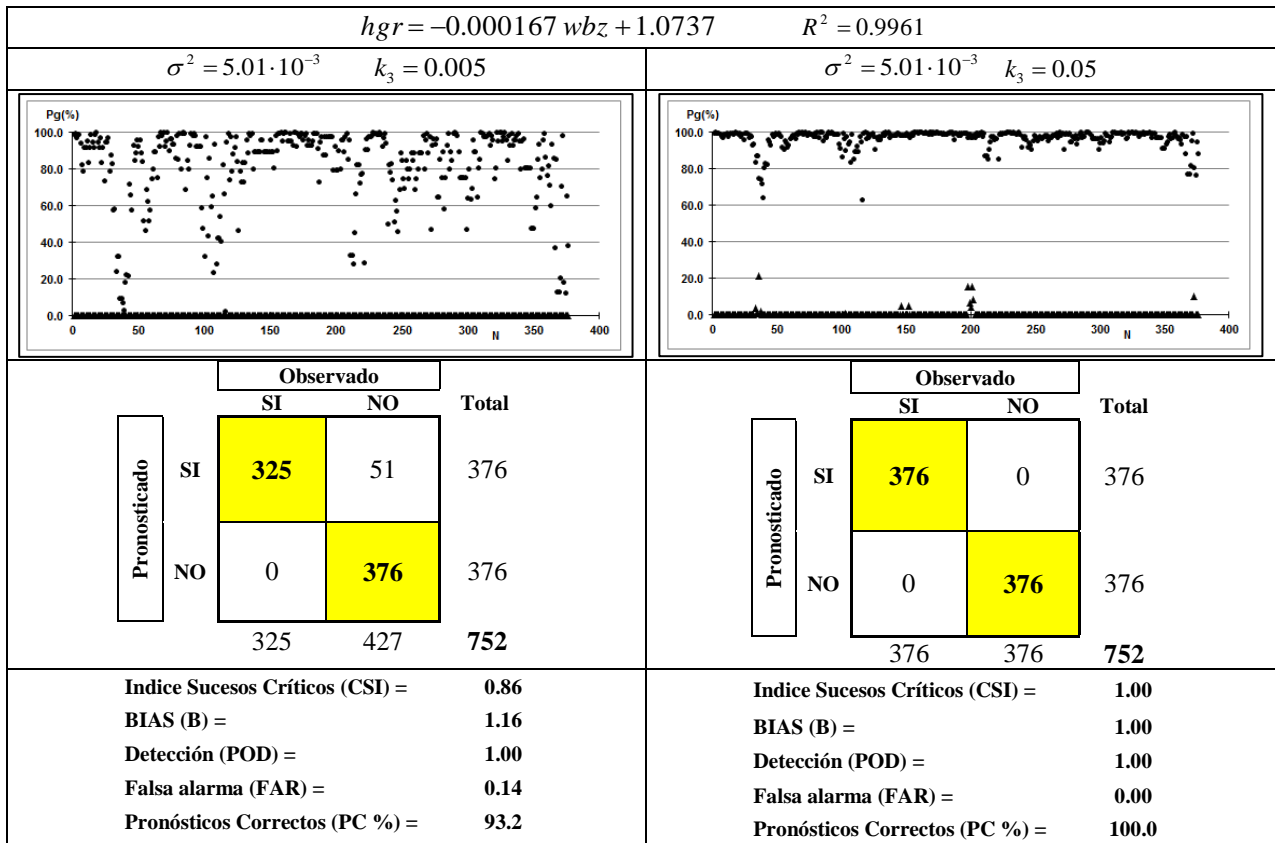


Fig. 3.7. Función de aproximación lineal y su coeficiente de correlación, la varianza del cuadrado de la diferencia $(hgr - wbz)^2$, con los coeficientes de ajuste k_3 . Tablas de contingencias de las “cantidades” del pronóstico de caída o no de granizos y lo observado o no de caída de granizos (reportado). Índices de sucesos peligrosos, bias, probabilidad de detección, falsa alarma y total de Pronósticos Correctos.

Los resultados de la evaluación realizada al total de la muestra (752 casos), se presentan en la figura 3.7. En la parte superior de la figura se muestra la función de aproximación lineal (3.1) y su coeficiente de correlación, la varianza del cuadrado de la diferencia $(hgr - wbz)^2$ y los coeficientes de ajuste k_3 . En la distribución de caída de granizos y sin caída de granizos de acuerdo con dos valores diferentes del coeficiente de ajuste, se puede apreciar en el gráfico de la izquierda varios casos de caída con probabilidades inferiores al 60%, lo que no era correcto. Sin embargo, cuando se selecciona un valor adecuado del coeficiente de ajuste k_3 , se logra que todos los casos reportados de caída del granizo tengan una probabilidad superior al 60%, como refleja el gráfico de la derecha, bien diferenciados de los casos de no ocurrencias. En las tablas de contingencia (cantidad), que relacionan el pronóstico de la ocurrencia o no de caída de granizos, con la ocurrencia observada (superior al 60%), o no del evento, de igual forma muestran la distribución de frecuencias en cada caso. En la parte inferior aparecen los resultados encontrados de iguales casos para los atributos escalares.

Como se puede apreciar, los resultados fueron significativos para la función de aproximación lineal (3.1), cuando se emplea adecuadamente su coeficiente de ajuste k_3 . En el caso mostrado a la izquierda, el producto de $k_3 = 0.005$ con la varianza del cuadrado de las diferencias redujo el índice de sucesos peligrosos de $CSI = 0.86$, un bias que indica una sobre valoración $B = 1.16$, una falsa alarma $FAR = 0.14$ y un total de pronósticos correctos de 93.2%. Pero cuando se tomó $k_3 = 0.05$ de la tabla 3.1, el producto de k_3 con la varianza del cuadrado de la diferencia $(hgr - wbz)^2$ no permitió ningún día sin caída de granizos, mostrando un índice $CSI = 1.00$, una valoración correcta con $B = 1.00$, una probabilidad de detección $POD = 1.00$, ninguna falsa alarma $FAR = 0.00$, y el total de pronósticos correctos $PC = 100.0\%$.

Un aspecto a destacar es la sensibilidad que presenta la función (3.2) cuando el coeficiente k_3 toma diferentes valores, modificando con ello el valor del denominador y el resultado final de P_G . En la tabla 3.1 se muestran como varían los atributos escalares con diferentes valores del coeficiente de ajuste k_3 . Se muestra el resultado del total de los 752 casos correspondientes a los años 1986, 1989 y 2011, con una varianza de $5.01 \cdot 10^{-3}$, obteniéndose el mejor ajuste cuando los valores del coeficiente oscilaron en el rango de $0.04 \leq k_3 \leq 0.10$.

Tabla 3.1. Variación de los atributos índice de sucesos críticos, bias, probabilidad de detección, falsa alarma y del por ciento de pronósticos correctos, en función del valor del coeficiente de ajuste k_3 y una varianza de $5.01 \cdot 10^{-3}$.

$\sigma^2 = 5.01E-03$					
k_3	CSI	B	POD	FAR	PC
0.400	0.96	0.96	0.96	0.00	98.1
0.300	0.97	0.97	0.97	0.00	98.5
0.200	0.99	0.99	0.99	0.00	99.3
0.100	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.090	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.080	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.070	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.060	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.050	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.040	1.00	1.00	1.00	0.00	100.0
0.030	0.99	1.01	1.00	0.01	99.7
0.020	0.99	1.01	1.00	0.01	99.3
0.010	0.94	1.07	1.00	0.06	96.9
0.005	0.86	1.16	1.00	0.14	93.2

Lo anterior significa que es posible ajustar la función de probabilidad hasta que sea capaz de discriminar el evento que se investiga con un alto % de certeza, pero la selección del valor óptimo para lograrlo no puede ser arbitraria, sino que debe utilizarse un método adecuado de optimización de la función (3.2).

3.4 Zonas de probabilidad de caída de granizos con el modelo numérico

El procedimiento propuesto se implementó a la salida del modelo numérico WRF-ARW 3.1.1, con una resolución de 3 km, de manera de vincular la probabilidad de caída de granizos con el pronóstico de la

ubicación de la posible tormenta que los pudiera generar. Se presentan como ejemplos, uno con probabilidad de granizos y el segundo sin caída de granizos (Morfa, 2016).

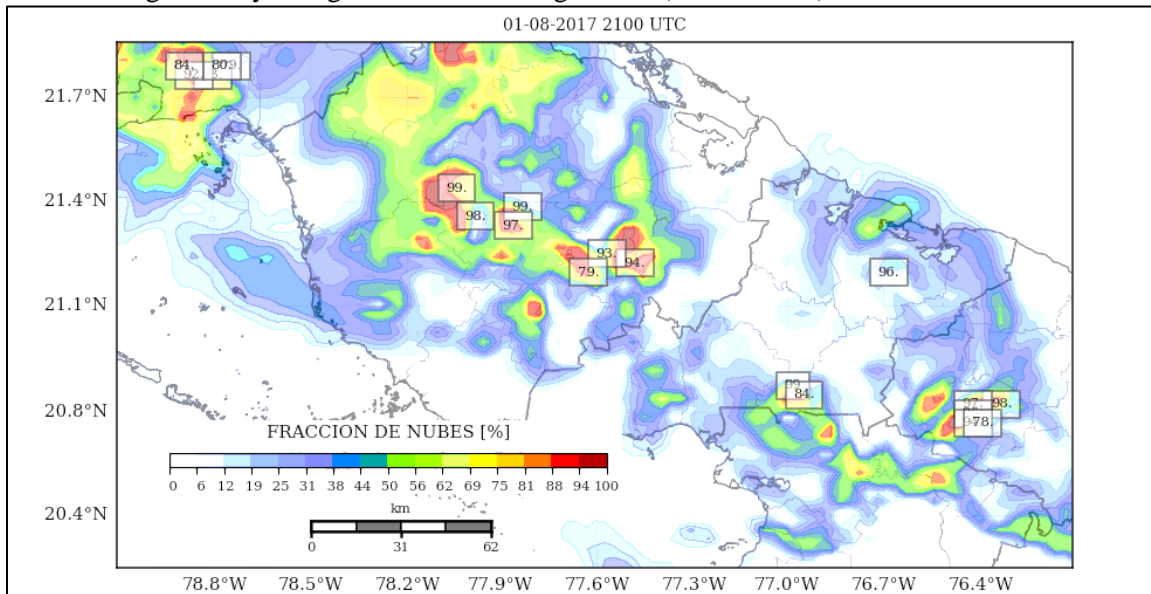


Fig. 3.8. Mapa pronóstico del 1 de agosto 2017 a las 2100 UTC con los valores de Pg(%).

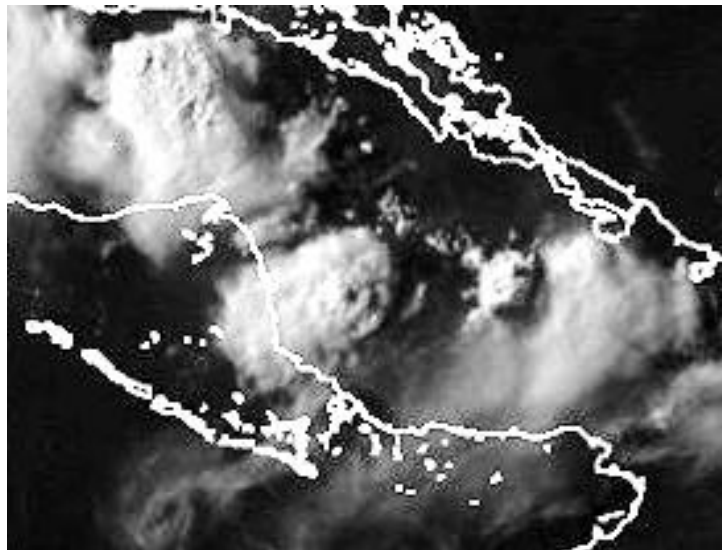


Fig. 3.9. Imagen obtenida por el satélite meteorológico el día 1 de agosto 2017 a las 2215 UTC.

En el ejemplo se muestra el mapa con las tormentas que pronosticó el modelo para las 2100 UTC, con la corrida de las 1200 UTC en la zona de la provincia de Camagüey (figura 3.8), el día 1 de agosto de 2017. Pueden observarse los valores de Pg(%) mayores a 60% junto a las tormentas. En la figura 3.9 se puede observar la imagen obtenida por el satélite meteorológico del mismo día a las 2215 UTC, como comprobación de la efectividad del procedimiento y del modelo. Ese día se recibió el reporte de una tormenta con caída de granizos a las 2220 UTC en la misma ciudad de Camagüey.

Conclusiones

1. El principal factor encontrado para la caída de granizos sobre Cuba, resultó ser la relación entre el espesor de la capa de la isoterma 0° C de la temperatura del bulbo húmedo con respecto a los 1000 hPa, y el espesor de la capa 500 – 1000 hPa. La probabilidad de caída de granizos aumentó cuanto menor era dicha relación, lo que permitió disponer de un criterio eficaz que discriminara la

ocurrencia o no del evento, y que posee la ventaja adicional de ser independiente de las coordenadas donde ocurra, del día del año y del procedimiento empleado para calcularla;

2. El procedimiento para calcular la probabilidad de caída de granizos se basó en que, las relaciones entre los espesores mencionados pueden ser representadas por una función lineal. La función de aproximación lineal encontrada presentó un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9961$ (prácticamente igual a una función cuadrática), lo que permitió calcular de manera simple las alturas teóricas de wbz y compararlas con el valor diario. A su vez, con la comparación entre ambas alturas se pudo emplear la función de probabilidad (3.2), la que permite pronosticar los casos cuando ocurre la caída de granizos (con probabilidad mayor al 60%), y discriminar el resto de los espesores cuando los granizos no alcanzan la superficie de la tierra;
3. La función de probabilidad (3.2) es muy sensible a los valores de su coeficiente k_3 , lo que permite ajustarla hasta que sea capaz de discriminar el evento que se investiga con un alto % de certeza. La selección del valor óptimo para lograrlo no puede ser arbitraria, sino que debe utilizarse un método adecuado de optimización;
4. La evaluación de este pronóstico no probabilístico, obtenido mediante el procedimiento empleado con adecuado valor de su coeficiente k_3 , resultó ser de alta capacidad predictiva, con un el índice de sucesos peligrosos de $CSI = 1.00$, una valoración correcta de $B = 1.00$, una probabilidad de detección de $POD = 1.00$, ninguna probabilidad de falsa alarma, y de pronósticos correctos de $PC = 100.0\%$;
5. El procedimiento empleado para calcular los espesores mencionados, permitió además ser utilizado como un pronóstico de la probabilidad de caída de granizos, mediante un pos - procesamiento específico del modelo numérico. La salida independiente del modelo puede mostrar los valores de probabilidad en las zonas donde se espera la formación y desarrollo de las nubes de tormenta que producen los granizos.

Recomendación

1. Utilizar el procedimiento en un modelo numérico operativo para el pronóstico diario de caída de granizos.
2. Encontrar mediante optimización numérica, una función que defina la dependencia del coeficiente de ajuste con la varianza de la muestra seleccionada, producto de la sensibilidad que presenta la función de probabilidad respecto a dicho coeficiente.

Referencias

- Aguilar, G., L. Naranjo & M. Carnesoltas, 2005: Sistema Experto para la predicción de tormentas severas en Cuba. ROSET (versión 2.0). Rev. Cubana de Meteor., 16, 1, 3 – 12.
- Aguilar, G., M. Carnesoltas & L. Naranjo, 2009: Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Periodo poco lluvioso. Rev. Cubana de Meteor., 15, 1, 3 – 13.
- Alfonso, A., 1994: Climatología de las tormentas locales severas en Cuba. Cronología. Editorial Academia, La Habana, 168 pp.
- Appleman, H. 1958: An investigation into the formation of hail. Nubila, 2, 28-37 pp.
- Benedico, O., M. Carnesoltas & G. Aguilar, 2005: Línea de confluencia del flujo a mesoescala. Situaciones a escala sinóptica favorables para su ocurrencia y su relación con las precipitaciones convectivas sobre Ciego de Avila, Cuba. Rev. Cubana de Meteor., 12, 2 43 – 50.
- Bermúdez, Y., 2009: Distribución espacial de las tormentas locales severas en Cuba. Informe de resultado. INSMET, Cuba, 37 pp.
- Brancato, G. N., 1942: The meteorological behavior and characteristics of thunderstorms. Hydrometeorological Tech. Paper #3, USWB, 22 pp.
- Byers, H. R and R. R. Braham, J. R., 1949: The thunderstorms. U. S. Government Printing office, Washington, 282 pp.

- Carnesoltas, M., & G. Aguilar, 2011: Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Periodo lluvioso. Rev. Cubana de Meteor., 17, 1, 13 – 31.
- Carnesoltas, M., 2011: Transformación de la energía en la convección atmosférica. Rev. Cubana de Meteor., 17, 1, 88 – 97.
- Carnesoltas, M., M. Sierra, D. Rabelo & E. Fernández, 2013: Factores físicos que influyen en la caída de granizos en las aeroavalanchas sobre Cuba. Informe de resultado. INSMET, Cuba, 65 pp.
- Carnesoltas, M., 2017: Fórmula lineal para determinar la temperatura del bulbo húmedo. Rev. Cubana de Meteor., 23, 1, 141 – 145.
- Cotton and Anthes, 1989: Storm and Cloud Dynamics. Academic Press, San Diego.
- Doswell III, C. and Schultz, 2006: On the use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms. Electronic J. Severe Storms Meteor., 1 (3), 1 – 22.
- Fawbush, E. J. and R. C. Miller, 1953: A method for forecasting hailstone size at the earth's surface. Bull. Amer. Meteor. Soc., 34, 235 – 244.
- Fawbush, E. J., and R. C. Miller, 1954: A basis for forecasting peak wind gusts in non-frontal thunderstorms. Bull. Amer. Meteor. Soc., 35, 14–19.
- Fernández, E., 2010: Algunas condiciones favorable para la ocurrencia de caída de granizos en Cuba. Trabajo de Diploma en opción al título de Licenciatura en Meteorología, INSTEC, Cuba. 76 pp.
- Foster, D. S. and F. Bates, 1956: A hail size forecasting technique. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 37, 135 – 141.
- Frisby, E. M. and H. W. Samsom, 1967: Hail incidence in the tropics, J App. Meteorology, 6(2), 339-354.
- García, R., 2016: La isoterma 0 °C del bulbo humedo y la caída de granizos sobre Cuba. Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Licenciado en Meteorología. Instituto superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba. 40 pp.
- Gilmore, M. and L. J. Wicker, 1998: The Influence of Midtropospheric Dryness on Supercell Morphology and Evolution. MWR, 126, 943 – 958.
- Griffith, M. M. Jr., 1970: An examination of the Wet-Bulb Zero as a Hail Forecasting Parameter in the Po Valley, Italy, J App. Meteorology, 9, 537-540.
- Haltiner, G. J. and F. L. Martin, 1957: Dynamical and Physical Meteorology. McGraw – Hill, New York, 470 pp.
- Johns, R. and C. Doswell III, 1992: Severe Local Storm forecasting. Wea. Forecasting., 7, 4, 23 pp.
- Martínez, Y., 2008: Condiciones favorables para la caída de granizos en Cuba. Trabajo de Diploma en opción al título de Licenciatura en Meteorología, INSTEC, Cuba. 48 pp.
- Martínez, Y., 2009: Ocurrencia de granizos en Camagüey, su relación con la isoterma de 0°C del bulbo humedo, 10 pp.
- Marzban, C. and A. Witt, 2001: A Bayesian Neural Network for Severe-Hail Size Prediction. Wea. Forecasting, 16, 600 – 610.
- Miller, R. C., and J. A. McGinley, 1977: Response to inherent difficulties in hail probability prediction and forecasting hail fall in Alberta. Meteorol. Monogr., 38, 153 – 154.
- Morfa, Y., 2016: Modelo bidimensional en la γ -meso escala para la simulación numérica del campo de viento y temperatura. VIII Congreso Cubano de Meteorología, Cuba. 21 pp
- Nelson, S. P., 1983: The influence of storm flow structure on hail growth. J. Atmos. Sci., 40, 1965 – 1983.
- Papas, J., 1962: A Simple Yes or No Hail Forecasting Technique. J. App. 353 – 354.
- Rasmussen, E. N., 1994: VORTEX operations plan. National Severe Storms Lab, Norman OK, 224 pp.
- Stull, R., 2015: Practical Meteorology. An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. University of British Columbia. 939 pp.

Wilks, D. S., 2006: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press, 467 pp.

<http://www.geonames.org>

<http://weatherfaqs.org.uk>

http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/qs_eurasia/daily