

# Condiciones termodinámicas asociadas a la ocurrencia de granizos en Camagüey.

Autor: Yilian Martínez Rodríguez

Centro Nacional de Pronósticos, Instituto de Meteorología de Cuba, [yilian.martinez@insmet.cu](mailto:yilian.martinez@insmet.cu)

## Resumen

*En el presente trabajo, se identificaron algunos parámetros termodinámicos asociados a la ocurrencia de granizos en la provincia de Camagüey, que permiten el pronóstico de dichos fenómenos. Esto se realizó mediante la aplicación de técnicas del Análisis Multivariante en una muestra independiente aleatoria escogida entre 1981-1996. Se determinó la utilidad del empleo de 5 variables y se encontró que de todas ellas: la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo es la variable que mayor capacidad de predicción presenta para la muestra utilizada, con una probabilidad de detección correcta del 82 % y una razón de falsa alarma del 15 %. Además se analiza un caso de estudio, donde se muestra como para un número consecutivo de días con similares ambientes sinópticos, se reportan umbrales distintos, que logran discriminaciones significativas.*

**Palabras Claves:** *parámetros e índices termodinámicos, granizos*

**Thermodynamic conditions associated with Camagüey's hailstorms.**

## Introducción

Los sistemas existentes que ayudan al pronóstico de Tormentas Locales Severas (TLS) en Cuba aún no están en condiciones de predecir adecuadamente fenómenos específicos de severidad como los granizos, por lo que dichas tormentas se producen sin que la población y el sector institucional puedan tomar medidas anticipadas, ni prepararse ante su ocurrencia. Es por este motivo que este trabajo se propone aumentar el conocimiento científico sobre la ocurrencia de granizos y así contribuir a su pronóstico.

Existen algunos signos y preferencias en las condiciones locales que se vinculan más a la ocurrencia de granizos que a otro tipo de severidad (Martínez, 2008), ofrece una visión previa acerca de la influencia de los procesos de fusión específicamente de la altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo en la ocurrencia de granizos en la provincia de Camagüey.

La formación y posterior precipitación de los granizos es el resultado de interacciones de un amplio rango de factores y procesos físicos. Uno de los factores que influye en la formación del granizo es la inestabilidad termodinámica de la atmósfera, mientras más inestable sea la misma, más capacidad tendrán las corrientes ascendentes presentes en la tormenta de soportar granizos mayores. Un elemento primario que contribuye a una corriente ascendente fuerte, es la flotabilidad térmica (área positiva) para las parcelas en ascenso. En general, a mayor flotabilidad, mayor será el potencial para que se produzca el granizo grande. Durante años esta relación ha sido un factor primario de cálculo usado para estimar el tamaño potencial de la piedra de granizo a nivel de tierra con los datos obtenidos con el radiosonda. (Fawbush, Miller, 1953; Foster, Bates, 1956).

Por otro lado el desarrollo y tamaño que alcanza el granizo pueden ser afectados grandemente por las variaciones de la estructura del viento a escala de tormenta, (Nelson, 1983). Estas variaciones estructurales afectan el tiempo de tránsito de los embriones de granizo a la zona de crecimiento del granizo. Debido a estos cambios, tormentas que ocurren en ambientes termodinámicos similares, pueden diferir en cuanto al tamaño, cantidad y distribución de los granizos que producen (superceldas o multiceldas).

Algunos investigadores y pronosticadores emplean índices termodinámicos para la predicción de granizos, por ejemplo: la energía convectiva potencial disponible (CAPE), el Índice de levantamiento (LI) entre otros. Ellos no son necesariamente parámetros de pronóstico, más bien constituyen un conjunto de variables de diagnóstico, (Doswell, Schultz, 2006).

Una variable diagnóstica es válida en un instante específico de tiempo, puede ser cualquier variable observada o calculada. Las variables de diagnóstico pueden conducir a percepciones defectuosas del estado de la atmósfera, debido a causas relacionadas con su cálculo y su representatividad. (Monteverdi, Doswell III, Lipari, 2003) encontraron que al menos para un tipo particular de severidad (tornados en California), el CAPE resultó ser de poco valor como un parámetro de pronóstico para discriminar entre casos de tornado y casos de no ocurrencia de tornado.

La mayoría de las variables diagnósticas ampliamente usadas no han sido validadas como parámetros de pronóstico correctos. Como variables diagnósticas, pueden ser útiles en evaluar cuantitativamente la condición de la atmósfera en el tiempo de su cálculo, pero su capacidad para informar a los pronosticadores sobre el tiempo en el futuro puede estar muy limitada, en el mejor de los casos.

Los factores que pueden afectar la aplicabilidad de las variables diagnósticas son disímiles, entre ellos se pueden citar: los errores de medición que dependen del instrumento que se utilice y errores de muestreo asociados con el número finito de observaciones. Estas clases de errores están asociados en gran parte por la volatilidad es decir, los cambios en el tiempo y el espacio como resultado de la sensibilidad de la medida y los errores de muestreo.

Mientras que el pronóstico para la vigilancia de tiempo severo en la mayoría de los países se enfoca a los algoritmos de estimación del tamaño del granizo; las perspectivas de la convección, reconocimiento de patrones y la climatología continúan jugando un papel fundamental.

(Johns, Doswell, 1992) expresan que el pronóstico de los fenómenos severos debe componerse de dos etapas: la anticipación de potencial del evento en el ambiente de la tormenta, y el reconocimiento de tormentas de esa clase, una vez que se han desarrollado. En este trabajo sólo se aborda el primer paso del pronóstico, interiorizando en la relación entre la tormenta productora de granizo y su ambiente; este último visto desde la óptica de sus características termodinámicas para un territorio dado, determinando la utilidad del empleo de índices termodinámicos para el pronóstico de granizos.

## **Materiales y Métodos.**

A partir del análisis pormenorizado de las técnicas de pronóstico descritas en base a su influencia en los granizos, y también considerando la posibilidad real de su obtención en función de los medios disponibles, se decidió enfocar la investigación en la escala temporal y espacial inmediata inferior a la sinóptica, que no incluye el pronóstico a muy corto plazo teniendo en cuenta la técnica de RADAR y de Satélite. La denominada escala intermedia que incluye plazos menores de 24 horas y dentro de un espacio que enmarca provincias o regiones, para lo cual la obtención y comparación de diferentes índices y parámetros permitiría implementar un sistema de aviso ante el riesgo de ocurrencia de una granizada y luego en conjunto con las técnicas de teledetección garantiza el seguimiento continuo en un período inmediato al suceso.

Dentro de todos los factores que pueden intervenir en la formación y precipitación del granizo para el presente estudio sólo se consideraron: la inestabilidad termodinámica que permite el desarrollo de una corriente ascendente fuerte que a su vez cause el crecimiento de los granizos y además se analizaron los efectos de los procesos de fusión en las piedras de granizo, que influirían en sus dimensiones y su consiguiente precipitación.

El estudio se enmarca en la década de los 80 y principios de los 90 del siglo XX, y espacialmente se circunscribe a la provincia de Camagüey, debido a que presenta una amplia secuencia de años con información proveniente de los sondeos y de la base de datos de TLS, asunto de primordial importancia para incrementar el carácter de precisión de las pruebas que se realizarán con posterioridad. Las variables empleadas se calcularon a partir de los datos de los sondeos aerológicos, disponibles principalmente en tres horarios las 1200, 1800 y 0000 UTC.

Las variables fueron seleccionadas teniendo en cuenta: su representatividad en el fenómeno y en la bibliografía consultada, la posibilidad real de su cálculo y limitaciones. Finalmente, se insertaron cinco variables en la investigación: el CAPE, LI, la altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo ( $H_{wbz}$ ), la integral de la temperatura del bulbo húmedo ( $\text{Int}(H_{wbz})$ ) y la temperatura media del aire ( $T_{am}$ ). Difieron unas de otras en cuanto a su significado en sí y a su obtención final para la inclusión en los cálculos, por ejemplo: en el caso de los índices CAPE, LI y la  $H_{wbz}$  se usaron tal y como los brinda el programa DRUIDA creado en el INSMET, las dos restantes requirieron de un tratamiento adicional.

Por ejemplo en el caso de la  $\text{Int}(H_{\text{wbz}})$  se utilizó un programa confeccionado en Borland Delphi 6.0 empleando una rutina iterativa para calcular la  $T_{\text{wb}}$  en cada nivel hasta la  $H_{\text{wbz}}$ . El procedimiento manual-directo empleado para la obtención de las otras variables a partir del Druida era prácticamente irrealizable. Con estas coordenadas de observaciones diarias de  $(T_{\text{wb}}, z)$  se calculó la integral en el asistente matemático Origin 6.0, para cada día. En la obtención de la  $T_{\text{am}}$  se procedió de forma similar que para la variable anterior, pero en este caso se promediaron las temperaturas del aire hasta la  $H_{\text{wbz}}$  empleando el software Microsoft Excell 97.

Se escogió una muestra aleatoria de 118 días, dividida en una muestra de análisis (MA) 78 casos, 39 de ellos se corresponden con días con granizo (C) y la otra mitad con días de no ocurrencia de granizos (NC), la otra muestra es la de validación (MV) y contiene 40 casos. Se conformó una base de datos donde a cada caso se le asociaron sus respectivos valores de las cinco variables incluidas en la investigación. A la muestra (118 casos) se le aplicarían técnicas del análisis multivariante específicamente análisis discriminante y árboles de clasificación; todas ellas forman parte del software estadístico STATISTICA 5.5. Antes de la aplicación de estas técnicas a la muestra se le realizaron: pruebas de bondad de ajuste, histogramas, tablas de frecuencia, gráficos de caja y bigote, gráficos de dispersión, matrices de correlación, pruebas de independencia, así como el cálculo de otros estadígrafos que se consideraron necesarios.

Finalmente se evaluaron los resultados mediante un caso estudio que consistió en la selección de un período de tres días consecutivos, independientes de la muestra anterior, que permitieran analizar la tendencia temporal de las condiciones termodinámicas existentes entre los días 20, 21, y 22 de julio del 2001, en los que se reportaron tres días con severidad. Para cada día se contó con información aerológica en dos horarios del día a las 1200 y 1800 UTC.

### **Aplicación de Técnicas del Análisis Multivariante a la muestra aleatoria.**

#### *Análisis estadístico preliminar de las variables independientes.*

Los histogramas de frecuencia para cada una de las variables, mostraron que CAPE es la que más se aleja de una suposición de normalidad, no obstante se aplicaron test no paramétricos de ajuste, específicamente: Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilks. El primero de estos logra aceptar la hipótesis de normalidad para todas las variables excepto para el CAPE, lo que coincide con la examen de los histogramas; en cuanto a la segunda prueba más rigurosa que la anterior solo acepta la hipótesis de normalidad con niveles de significación aceptables en el caso del LI.

Por otro lado se obtuvo, que la mayor correlación directa se tiene entre  $H_{\text{wbz}}$  y  $\text{Int}(H_{\text{wbz}})$  con un coeficiente de correlación de 0.8, así como la mayor correlación inversa es entre el CAPE y el LI, las restantes combinaciones mostraron coeficientes inferiores a 0.5.

En la Tabla. 1 se muestran cada una de las variables diferenciando entre los dos grupos de clasificación, se nota que el número de casos válidos (utilizados en el cálculo) disminuyó debido a que las variables CAPE y LI presentaron días en que no se pudieron calcular debido principalmente a sondeos truncados en determinados niveles.

Tabla. 1 Resumen Estadístico-Descriptivo de las variables distribuidas en cada grupo de ocurrencia. (MAC: Muestra de Análisis días con granizo y MAN: Muestra de Análisis días de no ocurrencia de granizo).

Valid N	Media	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rango	Rango	Std.Dev.
------------	-------	----	-----	-----	----	----	-------	-------	----------

Hwbz (m) MAC	31	4168,7	4194	2964	4709	4028	4402	1745	374	365,396
Hwbz (m) MAN	31	3898,9	3886	2781	5346	3623	4086	2565	463	550,0
Int Hwbz (m <sup>2</sup> ) MAC	31	43861	45077	28173	53259	40830	46502	25086	5672,4	5500,4
Int Hwbz (m <sup>2</sup> ) MAN	31	38657	40055	16055	56228	37122	42225	40174	5102,8	8065,5
Tma MAC (°C)	31	17,1	17,7	13,7	19,4	16,3	17,9	5,7	1,6	1,4
Tma MAN (°C)	31	16,7	16,5	10,2	20,1	15,5	18,2	9,9	2,7	2,2
CAPE (J/Kg) MAC	31	1121,9	815	0,1	4241	129,6	2234	4240,9	2104,4	1185,3
CAPE (J/Kg) MAN	31	1013,7	528,9	0,2	3780	46,6	1860,8	3779,8	1814,2	1101,1
LI MAC	31	-2,8	-2,4	-8,1	1,5	-4,6	-0,7	9,6	3,9	3
LI MAN	31	-1,9	-2,4	-8,7	4,9	-4,8	-0,1	13,6	4,7	3

La correlación entre los grupos se comportó de manera similar a lo expuesto para las variables en general encontrándose una alta correlación directa entre  $H_{wbz}$ -Int( $H_{wbz}$ ) y una fuerte correlación inversa CAPE y LI en los dos grupos, además se observa una correlación directa con un valor de 0.6 entre Int( $H_{wbz}$ ) y Tam en el grupo C de ocurrencia de granizos, la cual no se refleja en el análisis anterior. Los gráficos de caja y bigote para cada variable en función de los grupos de clasificación, muestran que las medianas para cada variable en el grupo de ocurrencia siempre fueron superiores a su contraparte de no ocurrencia excepto para la variable LI. El recorrido de valores que toman las variables en el grupo NC de no ocurrencia siempre contiene los valores que toma el grupo C de ocurrencia lo que confirma que los umbrales para los días de ocurrencia se encuentran solapados con los que no se reporta granizo, pero a su vez los primeros se agrupan en determinados valores. De la Fig. 1, se infiere que la  $H_{wbz}$  no toma valores superiores a los 5000 m en los casos de C, y además sus valores mínimos son superiores a los de NC, un 75% de la distribución para los C se concentra entre los 3900 y 4400 m, en cambio el 50% de los casos centrales de NC está por debajo de los 4200 m.

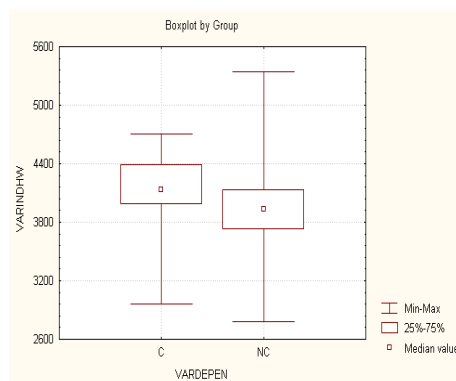


Fig. 1. Diagrama de la altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo (m) para los dos grupos de clasificación.

En cuanto a la Int( $H_{wbz}$ ) los casos de C toman valores notablemente altos, el 75% se encuentra por encima de 40000 °C/m y no toma valores inferiores a los 28000 °C/m, de aquí se puede concluir que para los días de C con una mayor preferencia, la variación de la temperatura del bulbo húmedo es más abrupta con la altura. Para el caso de la  $T_{am}$  el 100% de los casos de C se encuentra entre los 13.5 y 19.5 °C, se muestra una asimetría notable de la distribución hacia el Q<sub>3</sub> (cuartil 3), por otro lado la muestra de NC es asimétrica hacia el otro extremo Q<sub>1</sub>, es de resaltar que el 50% de los valores centrales de C se inscriben en el 50% de los de NC que se encuentra entre los 17.5 y 18.5 °C.

En la Fig. 2 se muestra que para las variables CAPE y LI el 50% de la distribución para ambos grupos abarca un rango de valores en extremo amplio y similar, aspecto no observado hasta el momento para ninguna otra variable.

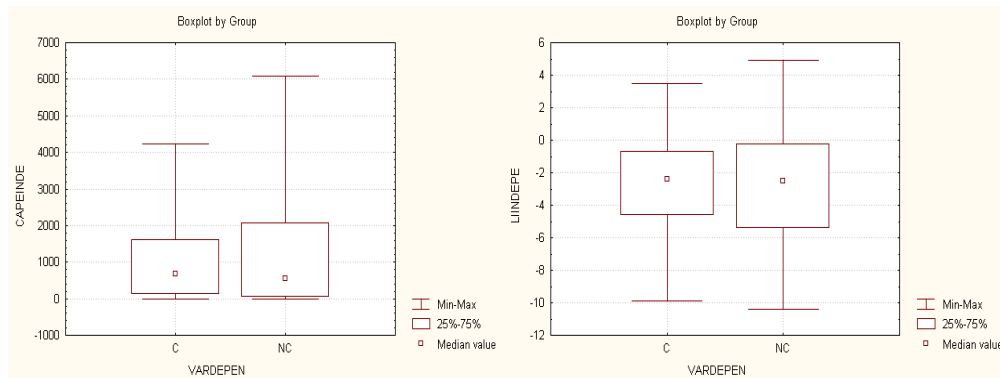


Fig. 2. Diagrama de las variables CAPE (J/Kg) y LI para los dos grupos de clasificación.

En el caso específico del CAPE solo un 25% de la distribución en los dos grupos alcanza valores superiores a los 2000 J/Kg, límite este que según la opinión de pronosticadores se clasifica como de gran inestabilidad. El LI muestra conclusiones parecidas pues sólo el 50% de los valores se encuentra por debajo de los  $-2^{\circ}\text{C}$ , todo esto para la muestra seleccionada.

En aras de corroborar con un nivel de significación determinado, las diferencias entre los grupos C y NC para las cinco variables empleadas, se aplicaron varias pruebas de independencia: t-Test, Kolmogorov-Smirnov para 2 muestras y la Mann Whitney. Todas ellas coinciden en rechazar la hipótesis de que las muestras provengan de la misma población para el caso de  $H_{wbz}$  y  $\text{Int}(H_{wbz})$  con una probabilidad superior al 95% en general y en el caso de la tercera prueba con una probabilidad superior incluso al 99%.

#### Resultados del Análisis Discriminante.

No obstante haber encontrado en el epígrafe anterior que algunas variables no cumplen fehacientemente las condiciones que requiere el análisis discriminante para una mayor exactitud de la solución, se procedió al cálculo del mismo. El proceso de cálculo del análisis discriminante se llevó a cabo mediante la técnica de prueba y error, realizando múltiples combinaciones de las variables hasta que se encontrara la que produjera un mayor % de casos bien clasificados en función de las pifias cometidas, esto con hincapié en la muestra de análisis.

Los ensayos que presentaron un mejor ajuste del total de pruebas efectuadas, en función de su capacidad de predicción, fueron calculados según el método de estimación simultánea y los métodos de estimación por etapas fueron probados, pero ya sea por el número de variables o el relativo incumplimiento de los supuestos no aportaron una exactitud mayor que el anterior.

En el caso de las estimaciones que involucraban las variables CAPE y LI ninguna resultó satisfactoria pues el poder de discriminación del total de pruebas no superó nunca siquiera el % de los casos bien clasificados, cuestión que se infiere del hecho de que ambas distribuciones poseen características muy distantes de los supuestos del método.

En la Fig. 3 se observan los resultados de las diferentes pruebas, tanto para la muestra de análisis como para la muestra de validación respectiva, en función de la probabilidad de detección correcta de ocurrencia de granizada (POD) y la razón de falsa alarma o sea, la probabilidad de clasificación de casos reales de no ocurrencia del fenómeno como casos de sí ocurrencia (FAT), aspecto que más incide en la bondad de las pruebas y que es razonable a causa del problema de la base de datos de reportes de TLS, la misma da una mayor seguridad para los eventos de ocurrencia, y no así para la cantidad de casos que se escapan y no son reportados que se asocian con los días normales o de no reporte de granizos.

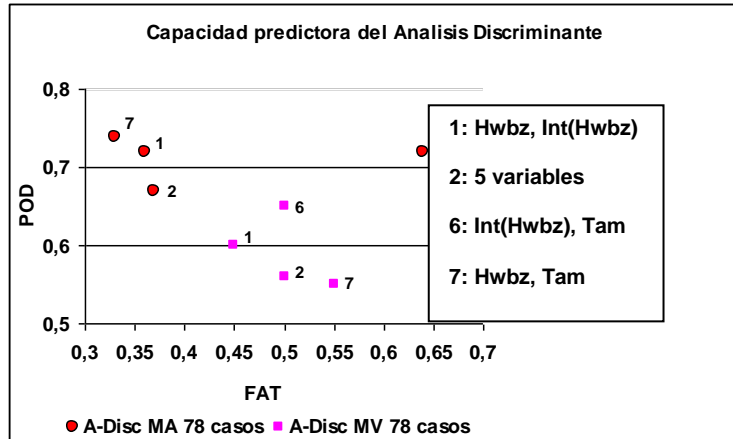


Fig. 3. Capacidad de predicción de algunas pruebas del Análisis Discriminante.

De todas las pruebas, la número 7 es la que presenta mejor ajuste ya que posee según el gráfico la mayor POD 74% y el menor FAT 36%, pero cuando se observan los resultados de la validación cruzada que se realiza con la muestra de igual nombre, estos no son igualmente satisfactorios, por lo que si se efectúa una ponderación de ambas clasificaciones para la muestra de análisis y la muestra de validación (MA y MV) entonces la prueba número 1 es la que muestra una mejor relación. Debido a que para la mayoría de las pruebas la muestra de validación no presenta resultados superiores a la muestra de análisis se hace hincapié en la estimación del método.

La prueba # 7, se obtuvo a partir de las variables  $H_{wbz}$ ,  $T_{am}$ , y la ecuación discriminante que se obtiene es:  **$Y = -0.0198 * H_{wbz} - 0,21948 * T_{am} + 11.65301$** ,

en la cual  $Y < 0$  para los casos que se consideran de ocurrencia de granizo (C) y si  $Y > 0$  entonces se clasifican como de no ocurrencia de granizo (NC), la variable que de forma individual aporta más a la exactitud del modelo es la  $H_{wbz}$ , aunque se observa en la ecuación que el coeficiente de ponderación de esta variable modularmente es inferior que el de la  $T_{am}$ , en este caso es más razonable analizar los coeficientes de estructura que poseen una mayor estabilidad y describen la correlación simple entre las variables y la función, cuyos valores destacan precisamente a la variable referida.

Los casos que se corresponden con granizos generalmente tienen asociados altos valores de  $H_{wbz}$  con valores de  $T_{am}$  moderadamente altos también, aunque esta última variable presenta menos diferencia entre grupos que la primera, por lo que cuando estas condiciones se observan en casos de NC estos son clasificados erróneamente y constituyen la probabilidad de FAT que es la que de manera más severa influye en la exactitud del modelo. Este resultado a su vez confirma que para días con C, la  $H_{wbz}$  en la mayoría de los casos está por encima de los 4000 m de altura.

#### *Resultados Árboles de Clasificación.*

##### Análisis de las combinaciones lineales:

Entre las posibilidades de los árboles de clasificación está: realizar estimaciones para más de una variable, es decir la obtención de combinaciones lineales de modo similar al análisis discriminante por lo que se hicieron diferentes experimentos con las mismas combinaciones de variables iniciales para comparar su capacidad de decisión con respecto al análisis discriminante.

En general, de estas pruebas no se deducen resultados superiores al análisis discriminante en el sentido de la proporción POD/FAT, tampoco la prueba que posee el mejor ajuste, coincide con su análoga del análisis discriminante en cuanto al conjunto de variables utilizadas, siendo para este caso específicamente la interacción entre:  $H_{wbz}$  y la  $Int(H_{wbz})$ . El árbol que se obtiene de dicha prueba a su vez denota una estructura enrevesada que dificulta su interpretación por lo que tampoco es el más indicado a considerar.

Análisis univariante:

De forma análoga a lo realizado en el análisis que le precede, primero se muestra la Fig. 4 donde aparece la probabilidad de detección contra la probabilidad de error para cada una de las pruebas que se efectuaron. En este caso en particular como el proceso analiza una variable a la vez el número de estimaciones es cinco (total de variables consideradas), debido a la insignificante capacidad de discriminación de las variables CAPE y LI, sus resultados no se muestran, de este hecho se infiere la poca capacidad predictora de tales variables para el pronóstico de los granizos en la muestra seleccionada, en una medida considerable no mostraron ser parámetros necesarios, ni persistentes, lo cual se vislumbraba desde el análisis estadístico de tales variables.

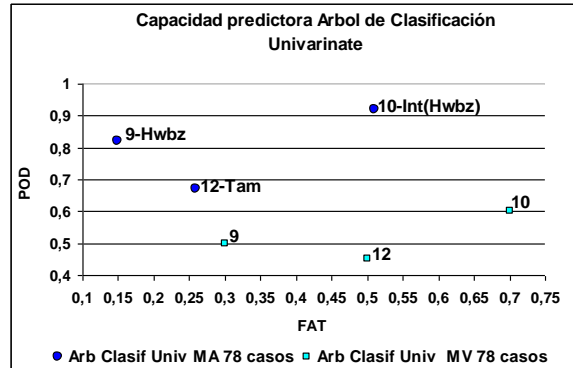


Fig. 4. Capacidad de predicción de las pruebas univariantes de los Árboles de Clasificación.

En el gráfico se observa que de todo el conjunto, la prueba que muestra los mejores resultados es la número 9 que representa la  $H_{wbz}$ , con una POD del 82% y FAT del 15% para la MA y su contraparte la MV aunque no supera a la anterior igualmente es bastante satisfactoria.

Un aspecto importante hasta el momento es que la variable  $H_{wbz}$  constituye el factor común de todos los análisis que arrojan las mejores clasificaciones, lo que demuestra su destacado carácter discriminatorio para los datos que se estudian.

A través de la Tabla. 2, se ilustran las especificidades del ensayo 9, se aprecia que el árbol presenta cinco nodos, tres de ellos son terminales, con dos condiciones de división, la primera de ellas envía los casos con  $H_{wbz}$  menores que 3974 m de altura hacia el nodo 2 donde se predice su pertenencia al grupo NC, solo seis casos de C se definen incorrectamente en esta clase. Por otra parte, los casos con  $H_{wbz}$  superiores a este nivel se insertan en el nodo 3 en el que se catalogan como casos de C, esta clase es la que presenta la mayor cantidad de eventos mal calificados que luego de una segunda condición de división al nivel de 4731 m finalmente produce 12 errores que se asocian a la FAT, y que al igual que en el análisis discriminante muestra una mayor dificultad en la determinación de casos de NC como casos de C.

Tabla. 2 Estructura del Árbol de Clasificación obtenido para la variable  $H_{wbz}$ .

Estructura del Árbol de Clasificación							
# Nodo	Izquierda	Derecha	N Clase	N Clase	C Predic	Condic /	Variable
1	2	3	39	39	C	-3974	$H_{wbz}$
2			6	24	NC		
3	4	5	33	15	C	-4731	$H_{wbz}$
4			33	12	C		
5			0	3	NC		

Por último en la Fig. 5 se grafican cada una de las pruebas que para cada método de estimación se refirieron como las de mayor capacidad de decisión para así tratar de determinar cuál del total es la que

logra el mejor ajuste. Se aprecia que entre los resultados del análisis discriminante y los árboles de clasificación existen diferencias marcadas, siendo estos últimos los de mejores efectos.

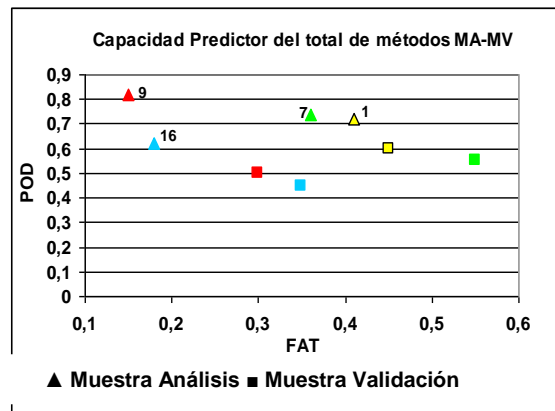
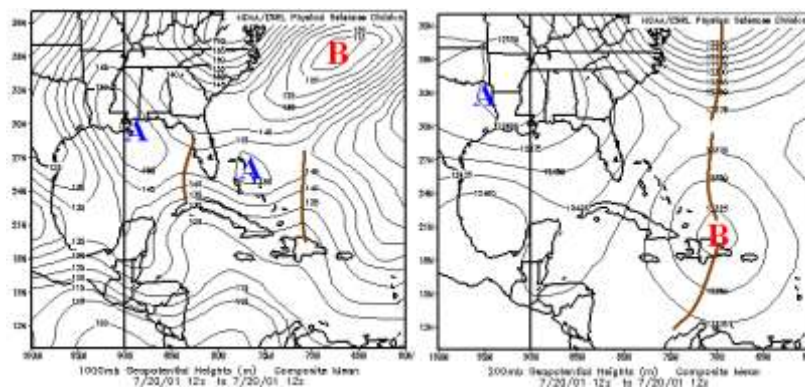


Fig. 5. Capacidad de predicción total de los dos métodos.

Resulta interesante que la prueba que presenta relativa sencillez en su cálculo, no incluye combinaciones lineales y solo depende de una variable, específicamente de la  $H_{wbz}$ , sea la que en resumen muestre la mayor capacidad de pronóstico, demostrándose su posible influencia en los disímiles procesos que provocan la formación y precipitación de los granizos.

*Casos de Estudio: 20-22 Julio 2001.*

La situación sinóptica imperante y común para todos los días fue la influencia en superficie de débiles altas presiones oceánicas, una onda tropical reflejo de una baja fría en la altura ubicada al norte de La Española y que se trasladaba hacia el Oeste, Fig. 6 características que en combinación con el calentamiento diurno brindaban un escenario favorable para el desarrollo convectivo en horas de la tarde, a continuación se examina qué sucedió cada día y las consideraciones inferidas del análisis de los modelos estadísticos obtenidos.





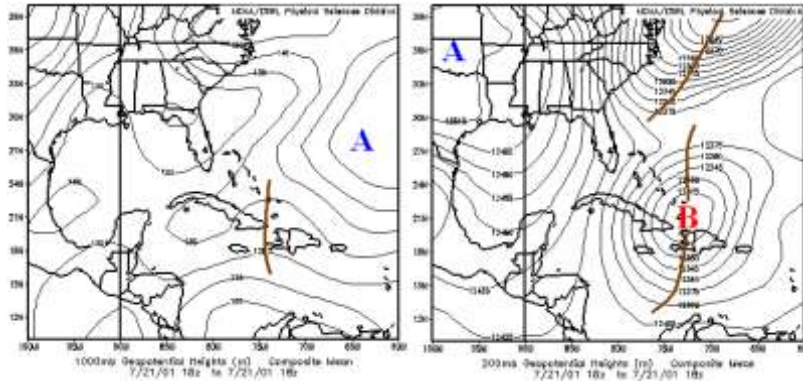


Fig.6. Altura Geopotencial, en los niveles de 1000 y 200 hPa (de izquierda a derecha), 20 y 21 de julio 2001. Figura extraída del sitio: (<http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/Composites/comp.hour>)

En la Tabla. 3 se muestran los cálculos realizados para cada día en los horarios de las 12 y 18 UTC, en base a: la prueba # 7 del análisis discriminante que involucra las variables  $H_{wbz}$  y  $T_{am}$  y la prueba # 9 del árbol de clasificación univariante para la variable  $H_{wbz}$ , explicadas en detalle en secciones anteriores.

Tabla. 3 Cálculos efectuados para los días analizados como casos de estudio.

Día	Hora UTC	Hwbz	Tam	A Disc	A Clasif
20	12	4087	15,7	0,11	C
20	18	3499	14,3	1,59	NC
21	12	4007	18,3	-0,30	C
21	18	4053	20,3	-0,83	C
22	12	3953	17,6	-0,04	NC
22	18	3946	21,1	-0,79	NC

Al calcularse las puntuaciones de clasificación para cada día a cada horario de sondeo se obtuvo: que de igual modo que para la muestra de análisis, el método de mejor capacidad predictora es el árbol de clasificación 9, con un 83 % de validez.

El día 20 de julio a las 3:30 pm ocurre una granizada en la Ciudad de Camagüey, el análisis discriminante no logra acertar en la clasificación como se observa en las dos primeras filas de la columna 5 en la Tabla. 3, en cambio el árbol de clasificación muestra un resultado interesante: si se analiza el sondeo diurno, este alerta la posible ocurrencia de granizos, pero en la tarde cuando la  $H_{wbz}$  experimenta un descenso pronunciado entre un horario y otro y la inestabilidad termodinámica es considerable, cambia de decisión lo cual podría deberse a que el sondeo referido a la 1800 UTC se efectúa en un ambiente perturbado por la inminencia de la ocurrencia del fenómeno. El día siguiente 21 de julio igualmente se produce caída de granizos esta vez en Nuevitas aproximadamente entre las 5:00 y 7:00 pm, para este caso ambos métodos aciertan en la predicción, este día la inestabilidad aumenta abruptamente a lo largo del día.

El día restante: 22 de julio, el análisis discriminante erra completamente en la clasificación; mientras que la prueba del árbol de clasificación discierne de forma correcta, y precisamente este día no se reportó ocurrencia de granizos en la zona de estudio.

Se evidencia cómo estas características pudieran diferenciar entre distintas manifestaciones de severidad, aunque se conoce que estos eventos muchas veces se reportan bajo una misma situación sinóptica, es ampliamente conocido que los mecanismos de formación y desarrollo entre ellos son diferentes dentro de una misma tormenta. Además se demuestra que para un número consecutivo de días incluso con similares ambientes sinópticos, características como estas reportan y muestran umbrales distintos que logran discriminaciones significativas. A través de la investigación se observa la posible utilidad del empleo de índices para predecir el riesgo de ocurrencia de granizo, por el momento solo se abarca una parte del proceso, que conjugado con otras técnicas del pronóstico inmediato de seguro aportarían mejores resultados.

## Conclusiones

El análisis estadístico de las variables permitió identificar a priori que el CAPE y el LI no presentaban capacidad de discriminación entre los grupos de ocurrencia /no ocurrencia de granizo para la muestra seleccionada.

La altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo es la variable que más contribuye en la capacidad de predicción con una POD del 82% y una FAT del 15%, asociada al error de clasificar casos de no ocurrencia como de ocurrencia de granizos debido a la subjetividad de la base de datos.

Los casos de estudio analizados revelaron que bajo una misma situación sinóptica, la vigilancia de parámetros termodinámicos puede elevar la capacidad de pronóstico de ocurrencia de granizos, aún más si se cuenta con técnicas de teledetección.

## **Bibliografía**

- Doswell III, C.A.; Schultz, D. M. (2006). On the use of indices and parameters in forecasting severestorms. *Electronic J. Severe Storms Meteor*, 1(3), 1–22.
- Fawbush, E. J.; Miller, R. C. (1953). A method for forecasting hailstone size at the earth's surface. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 34, 235-244.
- Foster, D. S.; Bates, F. (1956). A hail size forecasting technique. *Bull. Amer. Meteor. Soc*, 37, 135-141.
- Johns, R. H.; Doswell III, C. A. (1992). Severe Local Storm Forecasting. *Wea and Forecasting*, 7, 588-612.
- Martínez, Y. (2008). *Algunas condiciones termodinámicas que influyen en la ocurrencia de granizos en Camagüey*. Licenciatura en Meteorología, Instituto de Ciencias y Tecnologías Aplicadas.
- Monteverdi, J. P.; Doswell III, C. A.; Lipari, G. S. (2003). Shear parameter thresholds for forecasting tornadic thunderstorms in north-ern and central California. *Wea and Forecasting*, 18, 357–370.
- Nelson, S. P. (1983). The influence of storm flow structure on hail growth. *J. Atmos. Sci*, 40, 1965-1983.