

Caracterización y pronóstico de los procesos que dan lugar a las precipitaciones en Villa Clara durante el período poco lluvioso.

Autores: Aldo Saturnino Moya Álvarez, Conrado Álvarez Delgado, Marisela Purón Arbolae, Nancy Ruiz Cabrera.

Centro Meteorológico Provincial, Villa Clara. E-mail: cmpuc@civc.inf.cu

Resumen

En el trabajo se hace un análisis de los principales procesos que dan lugar a precipitaciones en el período poco lluvioso del año en la provincia de Villa Clara, en este caso se particulariza en las producidas por el fenómeno conocido como «brisote sucio» como una de las principales causas de lluvia en el territorio para este período del año. Sobre la base de los procesos que determinan el régimen de precipitaciones en la provincia, ésta se dividió en 5 zonas y se determinaron las condiciones sinópticas que dan origen a lluvias en cada una de ellas, así como la cobertura espacial de las precipitaciones. En aras de mejorar las predicciones se desarrollaron ecuaciones de pronóstico para cada una de las zonas, lográndose una ecuación de pronóstico probabilístico de ocurrencia de precipitaciones para cada una de ellas y otra para pronosticar la cobertura espacial de las mismas. En este sentido fueron incluidos, además de los casos típicos de "brisote sucio", aquellos en que las lluvias se producen fundamentalmente por la presencia de un frente casiestacionario o en estado de disipación paralelo a la costa norte de la región central del país. Para el diseño de las ecuaciones de pronóstico fueron tomados en cuenta solamente los elementos meteorológicos que se encuentran disponibles a los pronosticadores, en aras de lograr la operatividad de los resultados obtenidos.

Palabras claves: brisotes, brisote sucio, anticiclones migratorios, frentes casiestacionarios, frente de brisa de tierra.

Introducción:

Desde el punto de vista sinóptico las precipitaciones en Villa Clara durante el período poco lluvioso del año se producen bajo tres condiciones fundamentales:

1. La afectación al País por los frentes fríos generados en las vaguadas de los ciclones extratropicales que afectan al territorio del continente norteamericano.
2. La influencia de los anticiclones migratorios que suceden a los frentes fríos que afectan la región.
3. El estacionamiento y posterior disipación de frentes en los mares adyacentes a la costa norte del territorio nacional.

Otras situaciones sinópticas que pueden dar lugar a precipitaciones en este período son las bajas extratropicales y los ciclones tropicales extemporáneos.

Los frentes fríos constituyen para Cuba un proceso típico del período poco lluvioso del año, siendo a la vez el proceso que da lugar a los cambios de tiempo en el país. Estos frentes suelen ser precedidos (aunque no en todos los casos) por líneas de chubascos y tormentas eléctricas, las cuales pueden formarse a distancias de 200 a 300 km por delante de la línea frontal. En ocasiones estas líneas de chubascos y tormentas eléctricas pueden estar acompañadas de vientos fuertes e incluso se pueden presentar tormentas locales severas, como es el caso de la "Tormenta del Siglo" en marzo de 1993. También

al paso de la línea del frente por un determinado territorio se producen precipitaciones, aunque éstas frecuentemente no son significativas. El paso de los frentes fríos, los cuales en la mayoría de los casos en que entran en territorio cubano afectan la provincia de Villa Clara, constituye una de las causas fundamentales de ocurrencia de precipitaciones en dicha provincia en el período poco lluvioso del año.

Con posterioridad a que un frente frío afecta el territorio de la provincia de Villa Clara y continúa su avance hacia la región oriental del país el tiempo en la región comienza a ser dominado por los anticiclones migratorios. En estos casos, los diferentes estados del tiempo en Cuba van a estar determinados por el origen y las características de las masas de aire que acompañan a estos anticiclones migratorios. Frecuentemente estos centros de altas presiones se mueven por el continente norteamericano sucediendo a los sistemas frontales y saliendo al Océano Atlántico por las inmediaciones de Cabo Hateras. De esta forma se establecen inicialmente vientos de región nordeste sobre la provincia, los cuales, en la medida en que el centro anticiclónico avanza sobre el océano, van girando paulatinamente hasta imponerse un régimen de vientos del este o del estenordeste. Estos vientos, a los cuales se les conoce con el nombre de "brisotes" (Millas (1945)), se presentan generalmente en superficie con velocidades que llegan a alcanzar en ocasiones hasta 35 – 40 km/h.

Bajo el dominio de este patrón sinóptico las características de los procesos de mesoescala que tienen lugar en la región, y principalmente el frente de la brisa de tierra (Carnesoltas (2002)), comienzan a jugar un papel fundamental en la formación de nubes y precipitaciones en zonas próximas a la costa. La brisa de tierra en el litoral norte de la provincia de Villa Clara adquiere un rumbo próximo al sur – suroeste y no obstante a que pasa prácticamente inadvertida ante las mediciones instrumentales de las estaciones meteorológicas debido a la debilidad de los gradientes horizontales de temperatura, a su pobre definición en el plano vertical y a la fuerza de los vientos producidos por la circulación general, se ha podido demostrar a partir de un análisis riguroso de los registros instrumentales y de los campos de viento y temperatura a escala meso - β , la presencia de la discontinuidad térmica de la brisa de tierra (Carnesoltas (2002)). Esta situación particular da lugar a la formación de una franja de valores negativos de la divergencia del viento en superficie, la cual produce movimientos ascendentes del aire en la troposfera baja y por consiguiente da origen a la formación de nubes y precipitaciones en dichas zonas. La localización de esta franja de divergencia negativa oscila en dependencia del equilibrio entre el flujo general y la brisa de tierra por lo que en ocasiones puede encontrarse en zonas muy próximas al litoral costero y en otros casos suele alejarse hacia zonas francamente marítimas, lo cual está en dependencia de la relación entre la intensidad de la brisa de tierra y del flujo general.

Este fenómeno meteorológico, que en ocasiones da lugar a precipitaciones tierra adentro, llegando a registrarse con cierta frecuencia acumulados de interés en zonas próximas a la costa, los meteorólogos lo han dado en llamar "brisote sucio".

En otros casos, el área de bajas presiones que da origen al sistema frontal se mueve rápidamente por latitudes extratropicales, mientras que el frente frío en su porción sur permanece retrasado. Cuando esto ocurre se produce lo que se conoce con el nombre de "desbordamiento" del aire anticiclónico por delante de la línea frontal. Como consecuencia de este proceso el frente, a diferencia de los frentes clásicos, adopta una posición zonal, es decir, se orienta de este a oeste paralelo a la costa norte de nuestro país con poco movimiento (casiestacionario), comenzando un proceso de disipación, que puede mantenerse durante varios días. Paralelo a este proceso el anticiclón continental se mueve hacia el sudeste de los EEUU saliendo al Atlántico por las inmediaciones de Cabo Hateras, extendiendo sus isobaras paralelamente al frente casiestacionario y

produciendo un flujo del estenordeste o del este sobre gran parte del país como se muestra en la figura 1.

Todo este proceso da lugar a que en el flujo del este se produzca un arrastre de la nubosidad que acompaña al frente casiestacionario, la cual produce numerosas precipitaciones sobre las regiones oriental y central de Cuba, llegando en muchas ocasiones a afectar Matanzas, Ciudad de la Habana y la Habana. La figura 1 muestra la situación presentada el día 5 de noviembre de 1999, la cual dio lugar a numerosas lluvias en gran parte del país. Este proceso por lo general da lugar a precipitaciones que suelen ser muy superiores a las producidas por el «brisote sucio puro» y es una de las causas fundamentales de ocurrencia de lluvias intensas en el período poco lluvioso del año en algunas zonas de la provincia de Villa Clara. En estos casos el gradiente horizontal de temperatura es mucho más débil y por consiguiente la brisa de tierra también se manifiesta de una forma mucho menos notable. No obstante, aunque las precipitaciones en estas situaciones puede extenderse prácticamente durante todo el día y el papel fundamental lo juega la presencia de un frente casiestacionario, con mucha mayor frecuencia las mayores intensidades en la lluvia tienen lugar en horas de la madrugada y en las primeras horas de la mañana, lo que sugiere la influencia, aunque más débil, del frente de brisa en estos horarios.

Estos fenómenos han sido estudiados además en los trabajos de González *et al.* (1986), Alfonso (1994), Fernández (1987, 1994) y Portela (2002).

Los estudios realizados por Fernández *et al.* en 1994 arrojaron como resultado que con la ocurrencia de precipitaciones sobre tierra relacionadas con estos fenómenos guardan relación dos variables fundamentales, la componente meridional del gradiente de presión y el módulo del gradiente de presión sobre la zona de estudio. Sin embargo el pronóstico de la ocurrencia de precipitaciones a consecuencia de estos fenómenos es algo más complejo, ya que los procesos que dan origen, ya no al desplazamiento de las áreas de lluvias sobre un territorio determinado, sino a la evolución de dicha nubosidad en la zona, ocurre mayoritariamente sobre áreas marítimas, donde predomina la escasez de datos meteorológicos, principalmente de datos de aire superior. En el caso en que sobre la zona de afectación domina un anticiclón migratorio que está dando lugar a brisotes, pero no existe frente casiestacionario sobre la costa norte de Cuba no solo hay que hablar de condiciones para la evolución de la nubosidad, sino de condiciones para la formación y desarrollo de esta y de ahí la posibilidad de que tenga lugar un "brisote sucio".

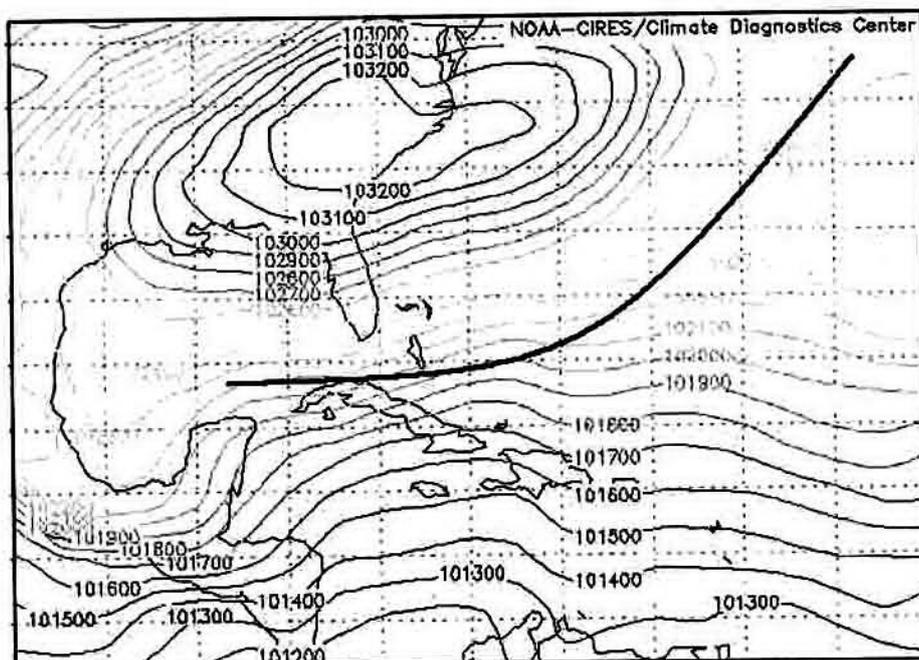


Fig. 1 Patrón imperante el 5 de noviembre de 1999.

No obstante, se han obtenido varios métodos que han intentado realizar un pronóstico objetivo de precipitaciones a partir de estos fenómenos. Fernández, en 1994, obtuvo una ecuación para predecir la ocurrencia de "brisote sucio" en la región oriental de Cuba y estimar su intensidad, basado en los datos de salida del campo de presión del modelo del Centro Europeo (ECMWF). De igual forma, Portela (2002) con ayuda del análisis discriminante obtuvo un método de pronóstico para un plazo de 24 horas de la ocurrencia de "brisote sucio".

El correcto pronóstico de precipitaciones producidas por estos fenómenos, así como el conocimiento de sus manifestaciones en una región determinada del país, es de vital importancia para los intereses de la economía, el gobierno y la defensa civil. En el caso específico de Villa Clara, estos fenómenos afectan frecuentemente las áreas aledañas a las zonas costeras del territorio, donde son importantes los intereses agrícolas de la provincia y principalmente los intereses de la agricultura cañera, máxime cuando la zona se caracteriza por un relieve bajo, donde son frecuentes las inundaciones, que entorpecen el buen funcionamiento de las labores agrícolas, fundamentalmente en el período de Zafra.

Un ejemplo de ello lo constituyen las lluvias producidas el 6 de diciembre de 1991, cuando se produjeron numerosas precipitaciones en la provincia con acumulados superiores a 50 mm en varios puntos de la costa norte. El 16 de marzo de 1993 se produjo un fenómeno «brisote Sucio» que dio lugar

a acumulados importantes en gran parte de la provincia, y especialmente en la zona de Santo Domingo, donde se registraron 112 mm en 24 horas. El 25 de noviembre de 1997 se registraron más de 60 mm de precipitación en 24 horas en varios puntos del sector nordeste de la provincia.

Estos y otros casos ejemplifican la importancia del conocimiento de este importante fenómeno, que se incrementa por ser uno de los procesos que más influye en la ocurrencia de precipitaciones en el período poco lluvioso del año en la provincia de Villa Clara.

En el presente trabajo se pretende realizar un estudio de la distribución espaciotemporal de las precipitaciones producidas por el fenómeno "brisote sucio" en Villa Clara, así como por la combinación de la influencia anticiclónica migratoria sobre el territorio en combinación con la presencia de un frente casi estacionario o en estado de disipación paralelo a la costa norte de Cuba. En este último caso, el frente de brisa de tierra, aunque en menor medida, también juega un papel importante.

Materiales y métodos

Para la realización del trabajo se utilizaron los mapas de superficie de la región Centro - Oriental de los Estados Unidos, Centroamérica y el Caribe, así como el Golfo de México, de los cuales se extrajeron los datos de presión en cada uno de los nodos de una rejilla regular de cuarenta puntos, la cual abarca desde

los 15 hasta los 35°LN y desde los 60 hasta los 95°LW. Se estudiaron solo los meses correspondientes al período poco lluvioso del año, es decir, noviembre – abril.

Para cada uno de los puntos internos de la rejilla se calcularon las componentes zonal y meridional del viento geostrófico y consecutivamente los valores de la dirección y módulo de la velocidad del mismo. Para realizar el procesamiento posterior de los datos se escogieron los resultados de los cálculos obtenidos para el nodo con latitud 22.5° LN y 80.0°LW, muy

cercan a la ciudad de Santa Clara. Este punto se correspondiente con el nodo central de la rejilla mostrada en la figura 2.

Esta rejilla fue utilizada para realizar el cálculo de las componentes del gradiente de presión con el empleo de las fórmulas (1 y 2), convencionales para el cálculo diferencial por el método aproximado de diferencia finita. Se aplicó además el filtro de Chuman para los gradientes horizontales.

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = \frac{1}{8dS} [(P_7 + 2P_2 + P_3) - (P_1 + 2P_4 + P_5)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial y} = \frac{1}{8dS} [(P_1 + 2P_2 + P_3) - (P_7 + 2P_6 + P_5)] \quad (2)$$

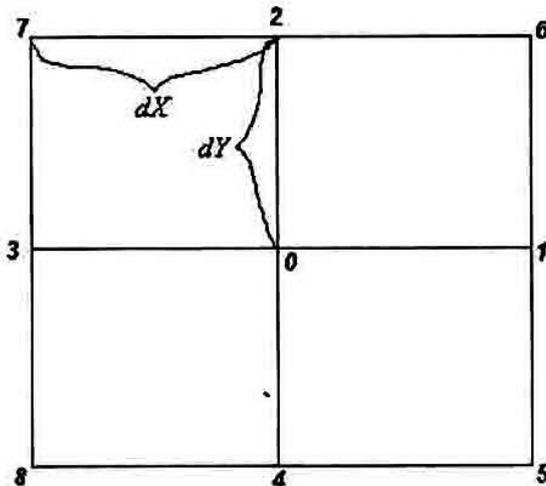


Fig. 2. Rejilla para el cálculo de los componentes del gradiente de presión

Aquí $dX = dY = dS$

P – Presión atmosférica al nivel medio del mar.

Los subíndices en las fórmulas 1 y 2 indican la correspondencia entre P y los nodos de la rejilla.

En la práctica, para realizar un pronóstico para 24 horas o más, el pronosticador deberá emplear el campo de presión en superficie obtenido como salida de un modelo hidrodinámico.

Se tomó una muestra de datos de precipitaciones de la provincia de Villa Clara, que al igual que los datos de superficie, abarcó desde 1988 hasta 1998, exceptuando 1996. Los datos de precipitación incluyeron 62 pluviómetros de la red de telecomunicaciones del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y los datos de las cuatro estaciones meteorológicas de la provincia. Los datos de las estaciones ayudaron, entre otras cosas, a identificar la génesis de las precipitaciones conjuntamente con los patrones de los campos de presión en superficie. De esta forma el margen de incertidumbre existente a partir de que la información de tele correos solo indica

acumulados en 24 horas quedó reducida a los casos en que se reportaron precipitaciones por los tele correos y no por las estaciones meteorológicas (inferior al 10% de los casos).

Para realizar el estudio se tuvo en cuenta además la presencia o no de frentes casi estacionarios extendidos paralelamente a la costa norte de la región central del País.

La provincia se dividió en 5 zonas (figura 3) atendiendo a la situación geográfica de las mismas en el contexto del territorio provincial. La división se realizó como sigue:

1. Territorio Noroccidental de la provincia.
2. Territorio del Centro - Norte de la provincia.
3. Territorio Sur - Occidental y Centro - Occidental de la provincia.
4. Territorio del Nordeste y Centro - Sur de la provincia.
5. Territorio montañoso.

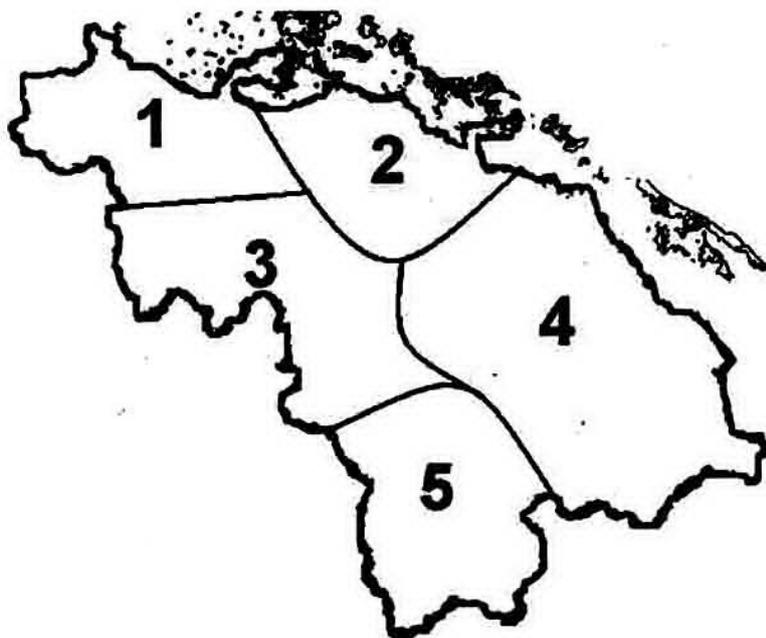


Fig.3. Zonas en las que se dividió la provincia de Villa Clara para la realización del estudio.

Las zonas fueron definidas atendiendo a la exposición que cada una de ellas presenta ante el fenómeno estudiado, a partir de la experiencia acumulada durante largos años de trabajo. La red pluviométrica de la provincia se encuentra uniformemente distribuida por cada una de las zonas determinadas. En lo adelante vamos a tratar el porcentaje de cobertura espacial de las precipitaciones a partir de la cantidad de pluviómetros que reportan lluvias en cada región y en la provincia. Esta condición se cumple con bastante justeza dado el planteamiento anterior.

Para el estudio estadístico del comportamiento de las precipitaciones bajo la afectación de estos fenómenos se empleó el método del Pronóstico Perfecto (Klein y Lewis, 1959), utilizado entre otros por Fernández en 1994 y en el Modelo Objetivo de Pronóstico de Precipitaciones (PROMETEO) en 1995. Este modelo ha alcanzado gran auge en las últimas décadas paralelamente al desarrollo de los modelos hidrodinámicos de pronóstico de campos de variables meteorológicas.

- Los predictores seleccionados para realizar el análisis fueron los siguientes:
- Componente zonal de la velocidad del viento geostrofico en superficie a las 12 UTC en el punto "0" de la rejilla mostrada en la figura 2.
- Componente meridional de la velocidad del viento geostrofico en superficie a las 12 UTC para el punto "0" de la rejilla.
- Dirección del flujo geostrofico en superficie a las 12 UTC para el punto "0" de la rejilla.

- Módulo de la velocidad del flujo geostrofico en superficie a las 12 UTC para el punto "0" de la rejilla.
- Parámetro alternativo que caracteriza la presencia o ausencia de frente casi estacionario paralelo a la costa norte de la región central del Cuba.

Los predictandos correlacionados fueron los siguientes:

- Porcentaje de pluviómetros con precipitación para la provincia y para cada una de las zonas por separado en el período comprendido entre la madrugada y la mañana del día para el cual se tomaron los predictores a las 12 UTC.
- Existencia o no de precipitaciones para la provincia y para cada una de las zonas independientemente en el período comprendido entre la madrugada y la mañana del día para el cual se tomaron los predictores a las 12 UTC.

Discusión de los resultados

Se realizó un estudio de correlación entre cada uno de los predictores seleccionados y los predictandos. La tabla 1 muestra los valores de los coeficientes de correlación para cada uno de los predictores y la cobertura espacial de precipitaciones para la provincia y para la región 4 respectivamente. Los predictores corresponden al horario de las 12 UTC, mientras que como predictandos se tomaron la ocurrencia o no de precipitaciones en el período comprendido entre la madrugada y la mañana, así como la cobertura espacial de las lluvias en el mismo período.

Tabla 1. Valores de los coeficientes de correlación entre los predictores seleccionados y la cobertura espacial de precipitaciones para Villa Clara y para la región 4.

Predictores	Cobertura Para VC	Cobertura Para R-4
Velocidad del Viento	0.63	0.65
Dirección del Viento	0.54	0.56
Componente zonal VV	0.43	0.47
Componente Meridional VV	0.63	0.65
Presencia de Frentes	0.80	0.81

Se puede observar que los predictores más informativos resultaron ser la presencia de un frente casiestacionario paralelo a la costa norte de la región central del país, la componente meridional del viento y el módulo de su velocidad propiamente. Si comparamos con la tabla 2, nos podemos percatar de que el coeficiente de correlación entre este predictor y la ocurrencia de precipitaciones es inferior, lo que implica que, si bien es prácticamente determinante la existencia de un frente o no en la cobertura espacial de las precipitaciones, la no presencia de éste no impide absolutamente que en más del 50% de los casos, al menos dos puntos en la provincia, registren lluvias. En este caso el papel de la velocidad y de la dirección del viento se hace más notable en relación con la tabla 1.

Existe una serie de factores que no han sido tomados en cuenta en el presente trabajo, fundamentalmente para facilitar la aplicabilidad de los resultados. Estos factores están relacionados con el estado térmico y el contenido de humedad de la masa de aire superpuesta a la superficie del mar en las zonas aledañas a las zonas de pronóstico, las propiedades de la batimetría costera y la temperatura del agua en la zona mencionada, así como el comportamiento del campo superficial de divergencia en la zona de estudio. Otros autores han incorporado además otros factores, como son el shear horizontal y el cambio de presión en 12 horas en el centro del anticiclón (Portela (2002)).

Tabla 2. Valores de los coeficientes de correlación entre los predictores seleccionados y la ocurrencia o no de precipitaciones para Villa Clara y para la región 4.

Predictores	Ocurrencia	Ocurrencia R - 4
Velocidad del Viento	0.63	0.70
Dirección del Viento	0.66	0.66
Componente zonal VV	0.43	0.51
Componente Meridional VV	0.69	0.70
Presencia de Frentes	0.59	0.59

La figura 4 muestra la distribución de la frecuencia de ocurrencia de precipitaciones producidas por estos fenómenos por meses en Villa Clara. Es claro el hecho

de que los meses de noviembre y diciembre son los meses en que con mas frecuencia se registran precipitaciones de esta índole.

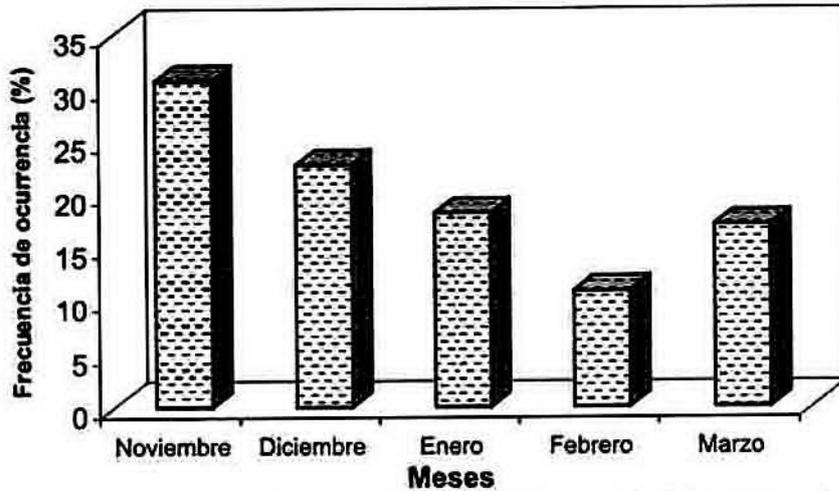


Fig. 4. Frecuencia por meses de ocurrencia de precipitaciones por los fenómenos estudiados

Tomando en cuenta los primeros resultados, obtuvimos el histograma de frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento para los casos en que ocurrieron precipitaciones y de frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento para los casos en que tuvieron lugar precipitaciones y aquellos en que éstas no ocurrieron. Los resultados se muestran en las figuras de la 4 a la 6.

En la figura 5 se puede apreciar que existe una moda bastante definida para las direcciones del viento entre los 82 y los 97°, lo que se corresponde con una dirección bastante próxima al este. Se observa además que solamente en el 10% aproximadamente de los días con lluvia la dirección del viento fue inferior a los 70°. No se registraron precipitaciones provocadas por este fenómeno para direcciones inferiores a los 34 grados ni superiores a los 130 grados. El predominio de direcciones del viento cercanas al este en la provincia de Villa Clara está relacionado obviamente con la orientación de la costa

(prácticamente noroeste – sudeste). La influencia de la orientación de la costa sobre la formación del frente de brisa de tierra ha sido tratada en las investigaciones de Carnesoltas (1986, 2002).

La figura 6 muestra la distribución de las velocidades del viento con ocurrencia de lluvias. En ella se observa un valor modal muy bien definido entre 9 y 11.5 m/s, las cuales se observaron en más del 40% de los casos.

Al analizar la figura 7, en la que se presenta la distribución de las velocidades para los casos sin precipitaciones, nos percatamos de que los valores que más se repiten (50.8%) son inferiores a 6.5, quiere decir, en el orden de 4 inferiores a los casos con lluvias. Lo anterior significa que para las direcciones antes mencionadas son necesarias altas velocidades del viento, sin embargo en este caso pretendemos cuantificar el efecto de la combinación de dichos factores, que juegan un papel muy importante en la ocurrencia del fenómeno en estudio.

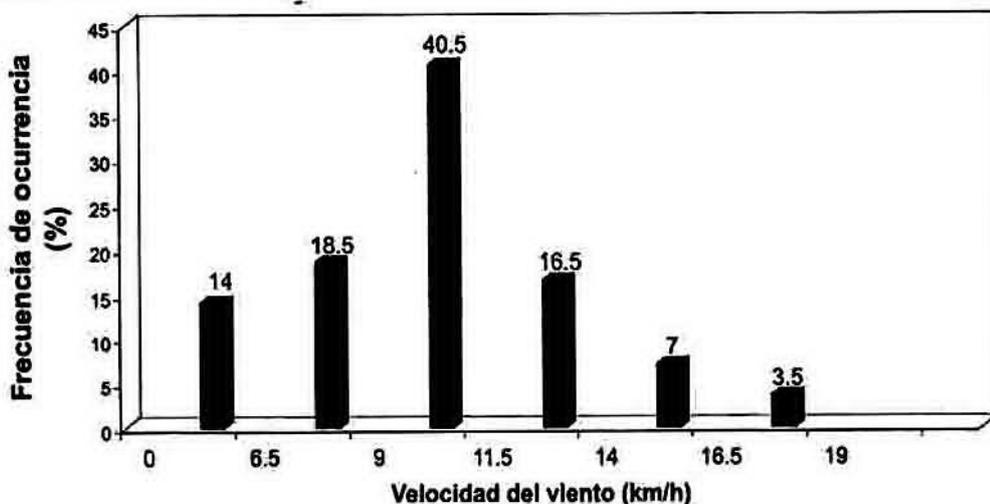


Fig. 6. Frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento para casos con precipitación

Uno de los principales objetivos que pretendemos con este trabajo consiste en regionalizar el régimen de precipitaciones producidas por estos fenómenos a partir del comportamiento de los factores meteorológicos que más relación guardan con ellos.

La tabla 3 muestra, por ejemplo, como se comportan estos factores en la región 3 en relación con la zona 4 cuando se produce un "brísote sucio". Se toma la región 4 como referencia porque es la zona en que con más frecuencia se producen precipitaciones provocadas por estas situaciones.

Tabla 3. Comportamiento de las precipitaciones en la región 3 en relación con la zona 4 para casos de ocurrencia de los fenómenos estudiados.

Zonas	Zonas con Precipitación	% Casos	% PCP	ddd (rumbos)	ff (m / s)
R-4	3 y 4	56.4	60.1	Este	12.5
R-3			47.8		
R-4	3	3.4	0.0	Este - sudeste	11.0
R-3			18.3		
R-4	4	40.2	32.0	Este	9.5
R-3			0.0		

En la tabla:

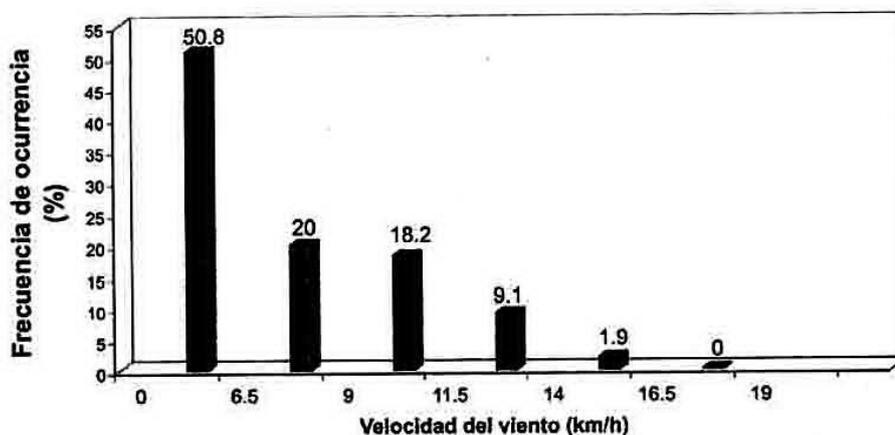


Fig. 7. Frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento para casos si precipitaciones.

ddd Dirección del viento

ff Velocidad del viento

% PCP Porcentaje de pluviómetros que registraron precipitaciones

% de Casos Porcentaje de casos con ocurrencia de precipitaciones en las zonas indicadas en la segunda columna en relación con el total de casos con precipitaciones..

El análisis de los resultados arroja que en el 56.4% de los casos en que se producen precipitaciones en la zona 4 por efecto alguna de las situaciones estudiadas, también éstas tienen lugar en la región 3, mientras que en el 40.2% se registraron lluvias en la zona 4 solamente. Se puede notar que la velocidad media del viento es menor en los casos en que llueve solamente en la zona 4 ($9.5 m / s$, por 12.5 cuando precipita en ambas zonas), quiere decir esto que la

probabilidad de ocurrencia de precipitaciones en la región 3 va a estar relacionada estrechamente con el módulo de la velocidad del viento. Como se puede apreciar, solo en el 3.4% de los casos llovió en la región 3 y no en la 4.

Para el resto de las zonas se realizaron los mismos estudios. Si observamos la Tabla 4, podemos darnos cuenta de que en la mayoría de los casos en que

tiene lugar precipitaciones en la región 4, ocurren lluvias también en la zona 2 (81.2%). Solamente en un 15% se encontraron precipitaciones en la zona 4 y no en la zona 2. Se aprecia, como en el caso anterior, que la velocidad media del viento es mayor en aquellas

ocasiones donde precipita en las dos zonas (10.2). Cuando la velocidad del viento es más débil la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones en ambas zonas es más baja. Solamente en el 3.3% de los casos precipitó en la región 2 sin que ocurrieran lluvias en la 4.

Tabla 4. Comportamiento de las precipitaciones en la región 2 en relación con la zona 4 para casos de ocurrencia de los fenómenos estudiados.

Zonas	Zonas con Precipitación	% Casos	% PCP	ddd (rumbos)	ff (m/s)
R-4	2 y 4	81.2	50.1	Este	10.2
R-2			50.7		
R-4	2	3.3	0.0	Este - sudeste	8.4
R-2			25.9		
R-4	4	15.5	39.3	Este	9.4
R-2			0.0		

Tabla 5. Comportamiento de las precipitaciones en la región 5 en relación con la zona 4 para casos de ocurrencia de los fenómenos estudiados.

Zonas	Zonas con Precipitación	% Casos	% PCP	ddd (rumbos)	ff (m/s)
R-4	5 y 4	55.2	62.5	Este	10.5
R-5			49.3		
R-4	5	1.2	0.0	Este - nordeste	6.0
R-5			42.8		
R-4	4	43.6	30.2	Este	9.5
R-5			0.0		

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos para la zona 5. Es interesante el hecho de que solamente en la mitad de los casos en que se producen lluvias en la zona 4, precipita además en la región 5. Hacemos énfasis en solamente ya que en la práctica operativa suele tradicionalmente realizarse los pronósticos de este fenómeno para ambas zonas al unísono en la gran mayoría de los casos, sin embargo, los estudios realizados muestran además que en el 42.8% de los mismos llueve en la zona 5 y no en la zona 4. Esta es la única zona de la provincia donde con alta frecuencia se producen precipitaciones a causa de estos fenómenos sin que éstas tengan lugar en la zona 4.

Es por ello que la frecuencia de casos con precipitaciones en la zona 5 es semejante a la de la zona 4 (Tabla 6). Ahora bien, resalta el hecho de que la velocidad del viento media en los casos en que llueve en la zona 5 y no ocurre así en la región 4 es de 6.0 m/s, es decir, notablemente inferior a los casos en que las precipitaciones tienen lugar en ambas zonas (10.5) o en la zona 4 exclusivamente (9.5). Este factor indica claramente que en días en que las condiciones no están dadas para que ocurran precipitaciones en otras zonas de la provincia, el efecto orográfico favorece la ocurrencia de lluvias en la zona montañosa de la provincia.

Tabla 6. Frecuencia de ocurrencia de precipitaciones para cada una de las zonas del total de casos estudiados.

Zonas	% Casos con Lluvia
R-1	6.6
R-2	9.4
R-3	6.5
R-4	11.0
R-5	11.0

La zona 1 es la más occidental de la provincia. En ella ocurren precipitaciones en el 55.1% de los casos en que éstas se presentan en la región 4 y nuevamente en este

caso la velocidad media del viento resultó ser mayor (10.4 m/s por 9.8 cuando precipita solamente en la zona 4), aunque en esta oportunidad la diferencia es menos notable.

Tabla 7. Comportamiento de las precipitaciones en la región 1 en relación con la zona 4 para casos de ocurrencia de los fenómenos estudiados.

Zonas	Zonas con Precipitación	% Casos	% PCP	ddd (rumbos)	ff (m/s)
R-4	1 y 4	55.1	59.3	Este	10.4
R-1			47.1		
R-4	1	3.3	0.0	Este - sudeste	9.0
R-1			26.8		
R-4	4	41.6	34.2	Este	9.8
R-1			0.0		

Para la elaboración de las ecuaciones de pronóstico se empleó el método de regresión lineal. La forma de

las ecuaciones obtenidas para el pronóstico de la cobertura espacial de las precipitaciones es la siguiente:

$$CAPZ\# = B(b_0 + b_1 Fr + b_2 ff - b_3 ddm) \quad (3)$$

donde:

ff Velocidad del viento

Z# Indica el número de la región

ddm Dirección del viento modificada.

Fr Indica la existencia o no de frente casiestacionario (1, 0).

CAP Cobertura espacial de las precipitaciones.

Para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones inicialmente se construyó la función alternativa F^* , la cual adquiere valores entre 0 y 1, en dependencia del valor de los

predictores. En este caso para realizar la regresión lineal fue tomada como predictando la ocurrencia (1) o no (0) de precipitaciones en cada región.

$$F = a_0 + a_1 Fr + a_2 ff - a_3 ddm \quad (4)$$

Posteriormente se construyeron los histogramas de frecuencia acumulada de ocurrencia de la función F . La figura 8 muestra el correspondiente a la región 1.

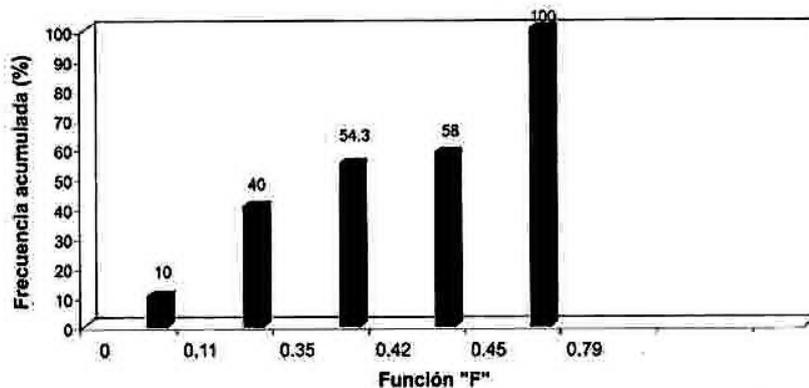


Fig. 8. Frecuencia acumulada de ocurrencia de la función F para la región

A partir de los histogramas construidos, para calcular la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones se aplicó la siguiente fórmula:

$$Prob = [(P_{ub} - P_{ua})(F - F_{u1}) / (F_{u2} - F_{u1})] + P_{ua} \quad (5)$$

donde:

F_{u1}, F_{u2} - Valores extremos de cada intervalo del histograma de frecuencia de ocurrencia de la función F .

P_{ub} - Probabilidad acumulada para el intervalo al cual pertenece la función en un caso concreto.

P_{ua} - Probabilidad acumulada para el intervalo interior al que pertenece la función en un caso concreto.

Por ejemplo, si para un caso concreto en la región 1 0.38, entonces:

$$P_{ub} = 54.3 \quad F_{u2} = 0.42$$

$$P_{ua} = 40.0 \quad F_{u1} = 0.35$$

$$Prob = 46.1\%$$

Tabla 8. Valores de los coeficientes empíricos empleados en el cálculo de las probabilidades de Precipitaciones.

Zonas	a_0	a_1	a_2	a_3
R-1	0.0201	0.4432	0.0085	-0.0167
R-2	0.0736	0.5164	0.0405	-0.05
R-3	0.0368	0.5525	0.0286	-0.035
R-4	0.0998	0.8018	0.0276	-0.0657
R-5	0.0241	0.4574	0.01	-0.0198

Tabla 9. Valores de los coeficientes empíricos empleados en el cálculo de la cobertura espacial de las precipitaciones.

Zonas	B	b_0	b_1	b_2	b_3
R-1	14.2857	0.0724	2.8984	0.1201	-0.2811
R-2	10.0	0.3507	3.8893	0.259	-0.7028
R-3	8.3333	0.1273	4.3254	0.299	-0.9809
R-4	4.0	0.7928	13.3573	0.6012	-1.2353
R-5	14.2857	0.0804	2.2626	0.19	-0.5204

Es necesario resaltar además que, como pudimos apreciar, las precipitaciones producidas por estos fenómenos ocurren con mayor frecuencia en las zonas 2 y 4, sin embargo, el resto de las zonas no está exento de ser afectado por este proceso meteorológico. Lo anterior implica que cualquier zona de la provincia puede ser afectada, y conjuntamente con ello, las actividades relacionadas con la agricultura, incluyendo la agricultura cañera. Debido a esto, cobra gran importancia el poder pronosticar, con uno o más días de antelación, la presencia de precipitaciones en una u otra zona por ocurrencia de dicho evento, lo que permitiría tomar las medidas necesarias para minimizar los daños que como consecuencia de ello pueden ser causados.

Como se pudo apreciar, los meses en el que con más frecuencia se producen estos fenómenos, coinciden con aquellos en que en nuestro país se desarrolla la zafra azucarera y se realizan otras importantes actividades de invierno, constituyendo así los fenómenos meteorológicos que con mayores probabilidades pueden interrumpir el normal desarrollo de las labores al aire libre, principalmente en los comienzos de las campañas de frío, por todo esto, poseer un modelo objetivo para pronosticar su presencia o ausencia; aún cuando todos los procesos físicos que dan lugar a su surgimiento y desarrollo no puedan ser tomados en cuenta; constituye una herramienta eficaz capaz de contribuir, junto a la experiencia de los especialistas del servicio meteorológico provincial y de los técnicos y directivos de las diferentes empresas vinculadas a las producciones azucareras y otros productos agrícolas, aprovechar al máximo las condiciones atmosféricas y limitar las pérdidas en caso de que éstas sean adversas. Por tanto el presente trabajo ayudará a mejorar la calidad de los servicios que hasta la fecha ha venido brindando el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara a diferentes entidades económicas del territorio, así como a los intereses del gobierno, el estado y a la población en sentido general.

Conociendo todo lo que en este trabajo hemos expuesto, recomendamos en primer lugar realizar un estudio más profundo sobre este fenómeno meteorológico, que contenga al menos, las condiciones existentes en la baja troposfera, incluyendo la dirección y velocidad del viento hasta el nivel 850hPa.

Conclusiones

Los objetivos que perseguíamos al realizar el presente trabajo fueron cumplidos y al analizar los resultados podemos llegar a las siguientes conclusiones:

La presencia o no de un frente casi estacionario o en estado de disipación al norte de la zona de pronóstico, la dirección y la velocidad del viento fueron los predictores más informativos de todos las variables procesadas.

En la medida en que la velocidad del viento se incrementa, se produce una extensión de las precipitaciones hacia el oeste de la provincia.

Atendiendo a la climatología de las precipitaciones producidas por los fenómenos estudiados, las zonas 2 y 4 pueden fusionarse en una única zona dado el hecho de que, en la gran mayoría de los casos, llueve (o no llueve) en ambas zonas al unísono.

Las direcciones "estenordeste" y "este" son las direcciones con que con más frecuencia ocurren precipitaciones por "brisote sucio".

La presencia de frentes en la zona de pronóstico juega un papel determinante en la cobertura espacial de las precipitaciones, pero no determina en la probabilidad de ocurrencia de las mismas.

La existencia solamente de un flujo zonal negativo fuerte, puede provocar la ocurrencia de lluvias en una región determinada, sin embargo, en este caso, los acumulados suelen ser poco significativos, mientras las precipitaciones más importantes se concentran, en las zonas 2 y 4.

El resultado fundamental del presente trabajo es haber obtenido un grupo de ecuaciones que permiten pronosticar, a partir de la información disponible a los pronosticadores, las probabilidades de ocurrencia de precipitaciones provocadas por brisote sucio, así como la cobertura espacial de las mismas.

Para aplicar los resultados del presente trabajo el pronosticador deberá contar, al menos con 24 horas de antelación, con el campo de presión en superficie obtenido como salida de un modelo hidrodinámico de pronóstico.

Referencias

Alfonso, A. P., 1994: «Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología». 168 pp.

Carnesoltas, M., 1986: La circulación local de brisa en Cuba. Tesis presentada en opción al grado científico de Candidato a Doctor en Ciencias. La Habana. Depositado en la biblioteca del INSMET. 96 pp.

Carnesoltas, M., 2002: La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 9, No. 1, p. 39 – 60.

Carnesoltas, M., 2002: El frente de la brisa de tierra. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 9, No. 2, p. 83 – 89.

Fernández, A. J., 1987: Métodos sinóptico estadístico de análisis y pronóstico de temperaturas extremas y lluvias para el territorio de Cuba. Tesis en opción al grado científico de Dr. En Ciencias Geográficas. Odesa, 267pp.

Fernández, A. J., Pino M. L., Santana O. A. y Navarrete J.O., 1994: Las precipitaciones asociadas a los brisotes de la región oriental de Cuba. 1994. Cienfuegos, Inédito.

González, O., 1986: Estudio sobre los brisotes. Tesis de diploma, La Habana, Inédito, 25 pp.

Klein, W. H. y Lewis, B. M., 1959: Objective prediction of five day mean temperature during winter. J of Meteorol., Vol. 16, p. 672 – 682.

Millas, J. C., 1945: Los brisotes en La Habana. Boletín. Observatorio Nacional Época IV, Vol. 1, No. 1, p. 73 – 83.

Portela, M. A., 2002: Pronóstico de la ocurrencia de «brisote sucio» en Cuba. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 9, No. 2, p. 49 - 53.