

Condiciones que favorecen el desarrollo de tornados en las provincias occidentales de Cuba en los períodos lluvioso y poco lluvioso

Favorable conditions for the development of tornadoes in the western provinces of Cuba during the rainy and dry season

Alis Varela-de la Rosa[✉], Mario Carnesoltas-Calvo

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

Resumen

Considerando el escaso conocimiento que aún se tiene de los tornados en Cuba, este trabajo se plantea encontrar diferencias entre las condiciones en que se forman estos fenómenos durante los períodos lluvioso y poco lluvioso en el archipiélago. Para la investigación se tomaron los reportes de tornados de la base de datos de Tormentas Locales Severas (TLS) del Instituto de Meteorología (INSMET), se analizaron las configuraciones sinópticas imperantes en las variables presión y altura geopotencial en los niveles de superficie, 850, 700, 500 y 200 hPa. Además, se tuvo en cuenta el comportamiento de la CAPE y CIN e índices termodinámicos, vorticidad relativa a escala sinóptica y la distribución de la humedad relativa, así como algunas características obtenidas por el radar e imágenes de satélite. Se encontraron una gran variedad de valores y configuraciones capaces de influir en la formación y ocurrencia de los tornados sobre Cuba, y al parecer, no se requieren altos valores de inestabilidad termodinámica para su génesis, pues existen condiciones dinámicas que pueden intervenir en su desarrollo. Existen marcadas diferencias entre la formación de los tornados entre el período poco lluvioso y el lluvioso, donde la génesis de los tornados débiles (F0 – F2), parece estar más relacionada con el avance del frente de brisa de mar y los frentes de racha de tormentas en disipación, jugando un papel trascendental la vorticidad generada por la interacción de estos sistemas con las celdas convectivas.

Palabras clave: tornado, índices termodinámicos, humedad relativa, vorticidad

Abstract

Considering the limited knowledge we have of tornadoes in Cuba, this research has as main objective to identify the differences between the conditions of tornadoes formation during rainy seasons and dry seasons. In order to do this, reports of tornadoes in the database of the Meteorological Institute of Cuba (INSMET) were used and the synoptic settings prevailing in the pressure and geopotential height variables in the levels of surface were analyzed such as, 850, 700,

[✉] Autor para correspondencia: Alis Varela-de la Rosa. E-mail: alis.varela@insmet.cu

Recibido: 27/1/2017

Aceptado: 12/9/2017

500 and 200 hPa. It was also investigated the behavior of the CAPE, CIN and thermodynamics indexes, synoptic-scale relative vorticity, and the distribution of relative humidity as well as some characteristics obtained by radar and satellite images. It was found a variety of values and configurations that can influence the formation and occurrence of tornadoes in this area, and apparently does not require high values of thermodynamic instability to its genesis, as there are dynamic conditions that may be involved in its development. It was also found marked differences between the formation of tornadoes between the dry season and rainy, where apparently the genesis of weak tornadoes (or low intensity ones), seems to be related to the advancement of the sea breeze front and interactions generated storms in a fund summary moderately unstable and not intensely unstable environments, playing a major role vorticity transferred by the mechanisms of interaction between storms and not the summary provided by the environment.

Keywords: tornadoes, indexes thermodynamics, relative humidity, vorticity

Introducción

Entre los fenómenos naturales que resultan perjudiciales al hombre, los de origen meteorológico son destacados, principalmente las Tormentas Locales Severas (TLS), no tanto por su frecuencia sino por los notables impactos que son capaces de producir. Según los autores de esta investigación, dentro de los tipos de severidad, no cabe duda que los tornados, es el más destructor de todos. Actualmente las investigaciones sobre estos fenómenos en todo el mundo continúa siendo una cuestión de interés científico, puesto que a pesar de existir diversas hipótesis sobre los procesos de formación y desarrollo de los tornados, aún no hay una teoría unificada. A pesar que los reportes de tornados en Cuba no pueden ser comparados con otras partes del mundo, su formación y desarrollo en el archipiélago es una realidad presente cada año, siendo una necesidad dar respuesta para minimizar los efectos negativos que ellos pueden producir ([Alfonso, 1994](#)).

Muchos son los autores a nivel mundial que se han referido a la formación y desarrollo de los tornados; [Doswell III \(1993\)](#) y [Bunkers \(2006 a, b\)](#), plantearon que para el diagnóstico del potencial severo del ambiente, se utiliza “la evaluación de parámetros e índices

termodinámicos, el descubrimiento de patrones a escala sinóptica y el conocimiento climatológico de su comportamiento”. Otro aspecto a tener en cuenta en la formación de los tornados son los valores de humedad en los niveles bajos ([Davies, 2002, 2004](#); [Rasmussen, 2003](#)), pues la existencia de suficientemente humedad relativa, tanto en las capas bajas como medias de la tropósfera, constituye una de las condiciones imprescindibles para el desarrollo de la convección. La organización que tenga la humedad relativa en la columna troposférica, condiciona la intensidad y magnitud que puedan tener las corrientes ascendentes y descendentes dentro de la celda convectiva; por lo que su distribución juega un papel fundamental en la posible aparición de un evento severo dentro de la convección profunda, como puede ser el caso de tornados.

En la formación de los tornados, la inestabilidad termodinámica que puede poseer el entorno resulta una condición necesaria pero no suficiente, sin embargo, la particularidad de su formación y desarrollo lo constituye la rotación de la corriente ascendente a partir de la posible vorticidad que pueda asimilar del entorno. En general, la ocurrencia de tornados se relaciona con las interacciones entre las escalas beta-macro-alfa -meso (la llamada escala sinóptica) y la escala beta y gamma

mesoescala. La primera de estas escalas aporta la energía necesaria para que se forme la convección profunda, mientras que las características físico - geográficas y las interacciones entre las circulaciones locales y superficies de discontinuidad, incentivan el potencial rotatorio de la tormenta y la posible aparición de tornados, de ahí la necesidad de no divorciar estas escalas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, con esta investigación se pretende continuar avanzando en la obtención de parámetros que intervienen a escala sinóptica en la formación de severidad y comenzar a dar los primeros pasos con el análisis de las condiciones a mesoescala. En este sentido, el **objetivo** de esta investigación fue determinar las condiciones en que se forman los tornados durante los períodos lluvioso y poco lluvioso en las provincias occidentales de Cuba, debido a las marcadas diferencias que existen en los patrones de la circulación en dichos períodos.

Materiales y Métodos

Como parte del proyecto de investigación “Distribución de las tormentas locales severas en Cuba y entornos favorables a mesoescala para su desarrollo” realizado entre los años 2008 y 2010, y dando continuidad al trabajo de [Acosta \(2008\)](#), en esta investigación se seleccionó como región de estudio las provincias occidentales de Cuba. Esta región comprende las provincias de Pinar del Río, La Habana, Artemisa, Mayabeque y Matanzas, así como el municipio especial Isla de la Juventud. Los reportes de los tornados fueron extraídos de la base de Tormentas Locales Severas (TLS) del INSMET, confeccionada como parte del mencionado Proyecto de Investigación, cuyas fuentes principales provienen de la red de Estaciones Meteorológicas de superficie del INSMET y de aficionados ([Aguilar et al., 2005](#)). Se utilizó la información del período

comprendido entre los años 2000 y 2009, seleccionando un total de 71 días con reportes con tornados, para un total de 75 tornados reportados. Según la clasificación de [Fujita & Pearson \(1973\)](#), ninguno de los tornados analizados fueron considerados como fuertes, es decir todos los reportes correspondieron a tornados débiles, entre F0 y F2.

Debido a que los patrones de circulación de la atmósfera para Cuba en el periodo lluvioso (mayo -octubre) difieren sustancialmente de los patrones en el período poco lluvioso (noviembre-abril), se decidió agrupar y analizar los reportes de tornados de acuerdo a los dos períodos fundamentales en que se distribuye la precipitación en Cuba, contando con 47 reportes de tornados en el periodo lluvioso (PLL) y 24 en el periodo poco lluvioso (PPLL).

A partir de aquí, se analizaron las condiciones a escala sinóptica de las variables presión y geopotencial en un dominio horizontal comprendido entre los 10° y 50° de latitud norte y entre los 60° y 110° de longitud oeste, que incluye todo el archipiélago cubano y sus mares adyacentes. Se analizaron 5 niveles de la tropósfera (superficie a nivel medio del mar, 850, 700, 500 y 200 hPa) los que constituyen los niveles básicos para el análisis de cualquier situación sinóptica. Los mapas fueron tomados en los horarios sinópticos (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC) y extraídos de la base de datos del NCEP (National Center of Environment Prediction)/NCAR (National Center for Re-Analysis), disponibles en el sitio web <http://www.cdc.noaa.gov>, la cual cuenta con una resolución espacial de 2.5 grados. El total de configuraciones sinópticas se agruparon teniendo en cuenta los 26 patrones encontrados por [Aguilar et al. \(2009\)](#) y [Carnesoltas et al. \(2010\)](#), configuraciones que constituyen un elemento a tener presente a la hora de pronosticar cualquier tipo de severidad en Cuba. Además, se tuvo en cuenta la

presencia de bajas frías ([Acosta, 2008](#)), las que se encuentran dentro de la vaguada medio-oceánica en niveles altos y condicionan al ambiente de una fuerte inestabilidad, que al combinarse con las condiciones locales incentivan el desarrollo de convección profunda a severa.

Se analizaron además los mapas de vorticidad relativa obtenidos del sitio <http://vortex.plymouth.edu/surface-u.html>, tratando de encontrar si esta variable a escala sinóptica desempeña un papel en la formación de tornados dentro de la convección profunda. Se tomaron los datos en el horario más próximo al reporte, así como una hora antes y una hora después del mismo, con el propósito de determinar qué valores de la vorticidad eran los que predominaban en la formación de los tornados. En este sentido sólo se pudo analizar esta variable en 62 casos, ya que el resto de los reportes no presentaban correctamente la hora. De aquí 38 casos correspondieron al PLL y 24 al PPLL.

Otro aspecto analizado fue la distribución vertical de la humedad relativa, a partir de cortes verticales en la longitud y latitud más próxima a la localidad del reporte del fenómeno. Los datos se tomaron en niveles con 50 hPa de espesor desde los 1000 hasta 500 hPa, disponibles en el sitio de la NOAA <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>. Tratando de establecer la distribución que predominaba en la humedad hasta niveles medios en presencia de este tipo de severidad, se tomaron para este análisis los valores de humedad relativa del día antes, el día del reporte y un día después,.

En el análisis de las condiciones termodinámicas se utilizaron los datos de los sondeos de la estación aerológica de Cayo Hueso por ser, de los disponibles, el más próximo al área de estudio. De los sondeos se utilizaron como variables diagnósticos la

Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) y Energía de Inhibición Convectiva (CIN), y los siguientes índices: Índice de Levantamiento (LI), Índice Showalter (SI), Total de Totales (TT), Índice K (K), y el Índice de Amenaza de Tiempo Severo (SWEAT).

Resultados y Discusión

Entre los años 2000 y 2009 en la región occidental de Cuba, los meses de máxima actividad en la formación de tornados fueron junio, julio y agosto, con un máximo absoluto en el mes de julio ([Figura 1](#)). De los 71 días con reporte de tornados, el 66.2 % de ellos ocurrieron en el PLL, lo que puede estar relacionado a que en este período es más frecuente la aparición de nubes cumulonimbos durante las tardes que alcanzan un gran desarrollo vertical, y bajo ciertas condiciones, como por ejemplo suficiente contenido de humedad en la capa 1000 – 700 hPa y el suministro estable y suficiente de calor en la Capa Fronteriza Atmosférica ([Carnesoltas et al., 2013](#)), son capaces de producir tiempo severo. En estos meses la convección profunda está condicionada, principalmente, por la interacción del frente de la brisa de mar con el flujo predominante del ambiente sinóptico, así como con el flujo de salida de las tormentas bajo ambientes sinópticos favorables.

Condiciones a escala sinóptica

Uno de los aspectos a tener presente a la hora de determinar el potencial severo del ambiente lo constituye la condición sinóptica imperante sobre la región de estudio. Del total de casos analizados, 60 se lograron agrupar dentro de los cinco patrones generales de severidad ([Aguilar et al., 2009](#); [Carnesoltas et al., 2010](#)), 36 dentro del PLL y 24 en el PPLL.

Dentro de los días analizados del PLL, 24 de los casos se agruparon dentro del patrón caracterizado por la presencia de la Vaguada

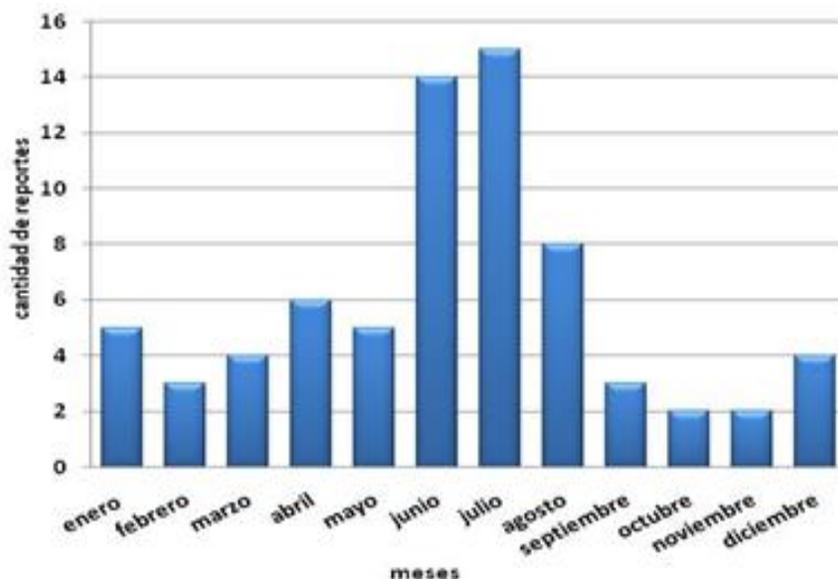


Figura 1. Distribución por meses de los 71 días con reportes de tornados entre los años 2000 y 2009

Tropical Troposférica Superior (por sus siglas en inglés TUTT). Encontrándose en ellos, la presencia de bajas frías en la altura en el 36.6 % de los casos, situación sinóptica identificada por [Acosta \(2008\)](#), como elemento que estimula la aparición de tornados dentro de la vaguada superior. Estas bajas se localizaron mayormente entre las zonas I, IV y V ([Figura 2](#)), las que constituyen las de mayor incidencia sobre la región occidental de Cuba.

Otra configuración encontrada para el 23.4 % de los casos analizados en el PLL, se relacionaba con la presencia de la hondonada de niveles medios ([Carnesoltas et al., 2010](#)) y engloba aquellos patrones donde la vaguada medio-oceánica no está claramente identificable y donde en niveles medios es posible definir la presencia de una vaguada sobre el este de los EE. UU. En tres casos de la muestra, la severidad fue producto de la influencia sobre la región occidental de circulaciones ciclónicas tropicales, típicas de este período y causantes por sí solas de severidad.

Además de las configuraciones identificadas en el PLL, se presentaron en 17 casos condiciones sinópticas donde aparentemente el ambiente no aportaba gran inestabilidad. En el 8.5 % de ellos prevaleció la influencia anticiclónica en prácticamente toda la columna troposférica y en el otro 8.5 % no estuvo clara la influencia sinóptica sobre la región de estudio. En estos días, al parecer el avance del frente de brisa de mar en interacción con el flujo predominante a mayor escala, fueron los factores desencadenantes de la aparición de la convección profunda en horas de la tarde, así como la formación de pequeños vórtices en la Capa Fronteriza Planetaria capaces de dar como resultado un tornado.

En 28 de los casos estudiados en el PLL se encontraron ondas tropicales en los mares al sur de Cuba, 15 de ellos asociados al sector oriental de la onda, donde se concentra la mayor inestabilidad. De estos casos, en 11 se presentaron conjuntamente con bajas frías en niveles superiores.

Un caso excepcional lo constituyó el tornado reportado el 24 de mayo del 2003, el cual se

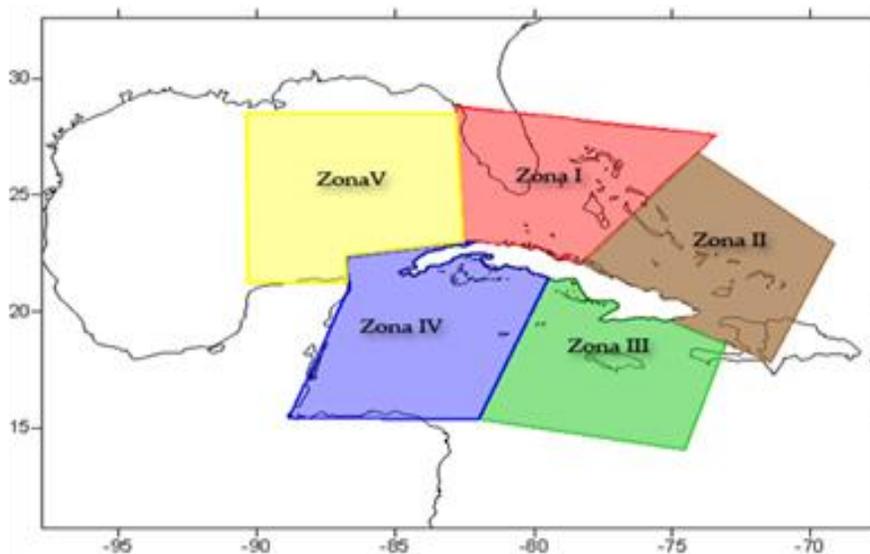


Figura 2. Localización geográfica de las zonas con Bajas Frías que intervienen en la ocurrencia de tornados en Cuba según [Acosta \(2008\)](#)

desarrolló durante el paso de un frente frío acompañado de una línea pre-frontal sobre la región occidental de Cuba. Aunque abril es considerado mes de transición del PPLL al PLL del año, cuando se puede encontrar alternadamente tanto condiciones del PLL como del PPLL, en ocasiones esta transición se prolonga hasta el mes de mayo y en este caso la presencia del evento El Niño-Oscilación del Sur, pudo condicionar a esta situación.

En el PPLL el 70.8 % de los casos respondieron a la configuración del Grupo 2 de este período ([Aguilar et al. 2009](#)). Este grupo engloba condiciones donde el factor predominante lo constituyen disturbios en el flujo del oeste, debido a ondas polares que generalmente se reflejan en superficie como frentes, sobre o en las inmediaciones de Cuba. El resto de los casos del PPLL correspondieron con la dorsal anticiclónica subtropical sobre Cuba, caracterizados por la presencia de la dorsal anticiclónica hasta el nivel de 700 hPa con un flujo de región sur que aporta calor y humedad en los niveles bajos de la tropósfera y un flujo frío del oeste sobre Cuba en los niveles superiores.

De manera general en el PLL, a pesar que un gran número de casos se encontraron dentro de patrones sinópticos ya identificados que favorecen la formación de severidad, se halló un grupo de casos que no respondía a ninguna configuración sinóptica previamente identificada, lo que sugiere que para ellos, la severidad fue inducida por las condiciones locales y no por el ambiente sinóptico. En cambio, en el PPLL, todos los casos se agruparon dentro de algunos de los patrones establecidos por [Aguilar et al. \(2009\)](#), sobresaliendo la influencia de frentes próximos a la región de estudio o por la afectación de las líneas prefrontales que los acompañaron en la mayoría de los casos.

Análisis de la vorticidad relativa a escala sinóptica

El surgimiento y desarrollo de un vórtice con eje vertical (que pueden llegar a convertirse en tornados), requiere de un par de fuerzas que lo inicie, en este caso constituido por la velocidad de los flujos que están detrás y delante de la superficie de discontinuidad o a un lado y al otro. Ya que el origen de este par puede

encontrase tanto en procesos a mesoescala, como en procesos a escala sinóptica, se analizó el aporte de vorticidad del entorno sinóptico, como uno de los primeros pasos en la investigación sobre el papel de la vorticidad en la generación de tornados sobre Cuba.

El análisis de los campos de vorticidad relativa, mostró que en el PPLL, tanto a la hora antes, durante y después de los reportes de los tornados, el mayor porcentaje de los casos se encontró bajo condiciones de vorticidad positiva (Tabla 1). En cambio para los casos analizados en el PLL el porcentaje más elevado de los casos se encontró bajo condiciones de vorticidad nula, es decir el ambiente sinóptico no aportaba ningún tipo de vorticidad capaz de ser adquirida por la celda convectiva y dar como resultado la rotación necesaria para generar un tornado.

Del anterior análisis se puede inferir que en el PLL, al no estar presentes las condiciones de vorticidad inducidas por el medio sinóptico, el factor que predominó en el aporte de la vorticidad necesaria para la formación y desarrollo del tornado, se encontraba en la interacción entre los flujos de salida de las tormentas y/o entre las celdas con la pendiente

del frente de brisa de mar. Si se comparan los porcentajes que se presentaron entre un período y otro, se podrá observar en la tabla 2, que los mayores valores ocurren en el PLL, lo que demuestra que en dicho período existen con mayor frecuencia condiciones favorables a mesoescala para la formación de los tornados que en el PPLL.

Tabla 2. Comportamiento de la vorticidad (positiva (+), negativa (-) o nula) en el PLL y PPLL a la hora antes, durante y después de los reportes de los tornados

		PPLL (%)	PLL (%)
Antes	(+)	38,1	61,9
	NULA	36,0	64,0
	(-)	43,8	56,3
Durante	(+)	50,0	50,0
	NULA	26,9	73,1
	(-)	43,8	56,3
Después	(+)	48,1	51,9
	NULA	22,2	77,8
	(-)	41,2	58,8
Total	(+)	45,6	54,4
	NULA	29,0	71,0
	(-)	42,9	57,1

Tabla 1. Distribución por períodos de la vorticidad (positiva (+), negativa (-) o nula) en los tornados una hora antes, durante y una hora después de los reportes

		PPLL		PLL	
		Nro. casos	%	Nro. casos	%
Antes	(+)	8	33,3	13	34,2
	NULA	9	37,5	16	42,1
	(-)	7	29,2	9	23,7
Durante	(+)	10	41,7	10	26,3
	NULA	7	29,2	19	50,0
	(-)	7	29,2	9	23,7
Después	(+)	13	54,2	14	36,8
	NULA	4	16,7	14	36,8
	(-)	7	29,2	10	26,3
Total	(+)	31	43,1	37	32,5
	NULA	20	27,8	49	43,0
	(-)	21	29,2	28	24,6

Análisis de la distribución vertical de humedad relativa

Una de las “condiciones necesarias” para la ocurrencia de la severidad local encontrada por [Carnesoltas et al. \(2013\)](#), es la existencia de suficiente humedad en las capas bajas y medias. La distribución que tenga la humedad en la tropósfera condiciona la intensidad y magnitud que puedan tener las corrientes ascendentes y descendentes, de ahí que esta variable juega un papel fundamental en la aparición de severidad dentro de la convección profunda.

Atendiendo al comportamiento de la distribución de la humedad en superficie y al comportamiento de los gradientes de dicha variable en los niveles bajos y medios, es decir en la inclinación que presentaban las curvas obtenidas para cada uno de los casos de la muestra, se pudo clasificar los 75 casos de reporte de tornado en siete grupos principales ([Figura 3](#)). De estos grupos el A, B y C, se caracterizaron por una gran humedad en los niveles bajos y un fuerte gradiente con la altura, lo que indica una distribución más pronunciada en los niveles superiores. Los grupos D, E y F presentaron valores de humedad algo menor en los niveles bajos que en los casos anteriores, siendo los gradientes para estos grupos más pequeños (curvas más rectas). Como en los anteriores grupos los gradientes del grupo D al F se van haciendo más pequeños hacia los niveles superiores. El grupo G surgió de la singularidad de los casos que lo componen, no presentando una distribución que se pudiera agrupar en los restantes casos. La distribución de casos por cada grupo se muestra en la [tabla 3](#).

Tabla 3. Distribución por cada grupo de la humedad relativa en la vertical

Grupo	A	B	C	D	E	F	G
No. casos	16	6	1	10	24	13	5

Los grupos encontrados mostraron cierta uniformidad con respecto a la distribución por períodos. Los grupos A y B fueron característicos del PPLL, aunque se presentaron casos (2 del Grupo B y uno del grupo A), entre los meses del PLL, específicamente en el mes de mayo, que como se explicó anteriormente, en ocasiones se comporta como si fuera un mes de transición, donde las condiciones pueden tanto semejarse al PPLL como al PLL. El caso que se clasificó dentro del grupo C se encontró en el PLL, específicamente en el mes de septiembre, el que igualmente se comporta como un mes de transición.

El grupo D también presentó casos en los dos períodos, aunque de forma general el mayor número de ellos se concentraban en el PLL. Los casos que ocurrieron en el PPLL se presentaron en meses que también se consideran de transición entre un período y otro, como son los meses de abril y noviembre. Los grupos E y F constituyeron graficas típicas del PLL, destacándose el mayor por ciento de casos en meses de junio, julio y agosto. El grupo G se presentó tanto en el PLL como en el PPLL.

En la [figura 4](#) se muestran las diferencias de gradientes en los grupos correspondientes al PLL y PPLL. Los mayores gradientes para el PPLL estuvieron presentes en toda la capa vertical, mientras que para el PLL se presentaron por debajo de los 900 hPa.

En los días que ocurrieron los tornados, el análisis de todos los datos mostró que las inversiones de humedad, se presentaron por encima de los 800 hPa, en cambio los mayores gradientes se concentraron por debajo de este nivel, con valores de 0,20 y 0,30 % por cada un hPa ([Figura 5](#)).

En la [figura 6](#) se puede observar las distribuciones medias de humedad relativa y de gradientes verticales para cada periodo. De estas gráficas se pudo concluir que en el PLL la capa más húmeda está por debajo de los

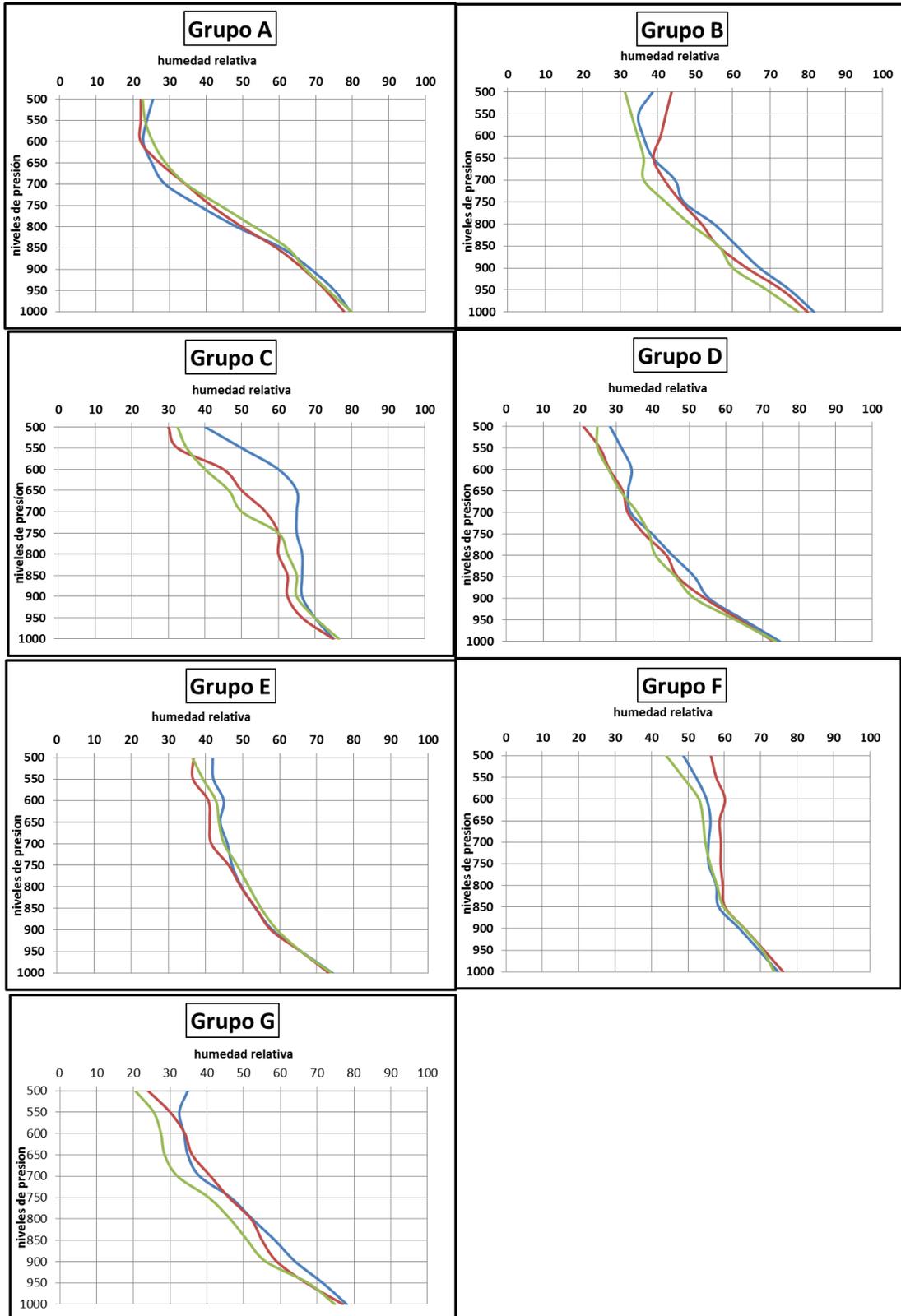


Figura 3. Grupos obtenidos del análisis de los perfiles verticales de humedad relativa. La línea azul corresponde al día antes del reporte, el rojo al día del reporte y el verde al día después del reporte

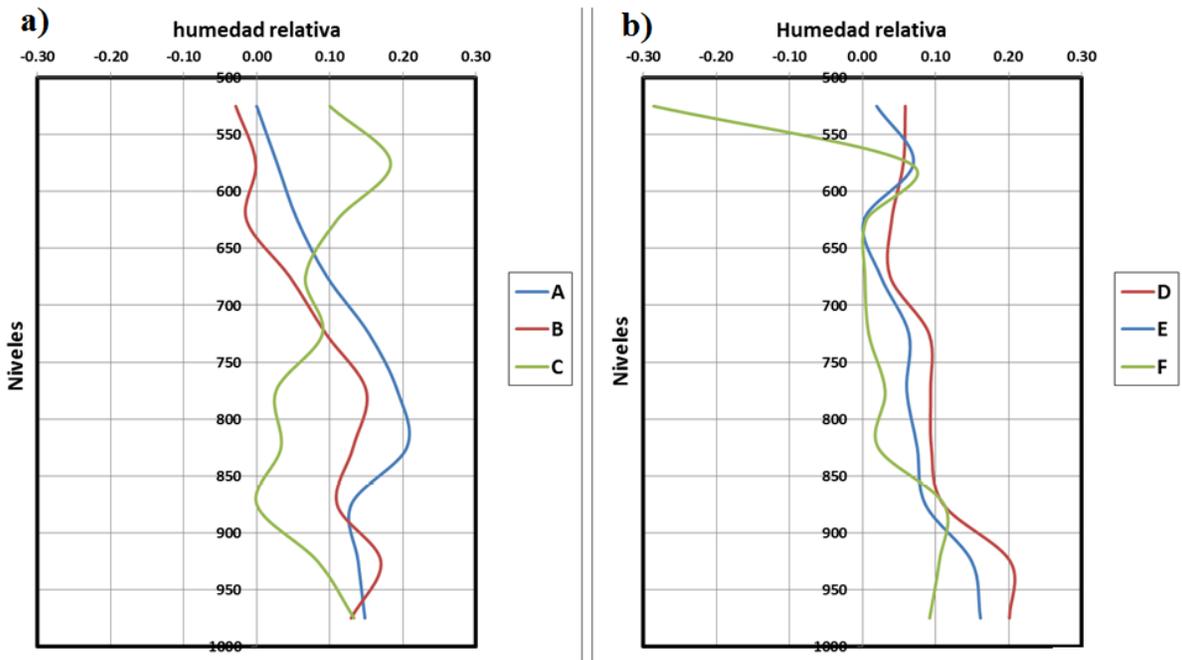


Figura 4. Distribución de los gradientes verticales de humedad relativa en los grupos característicos para el PLL (a) y PPLL (b)

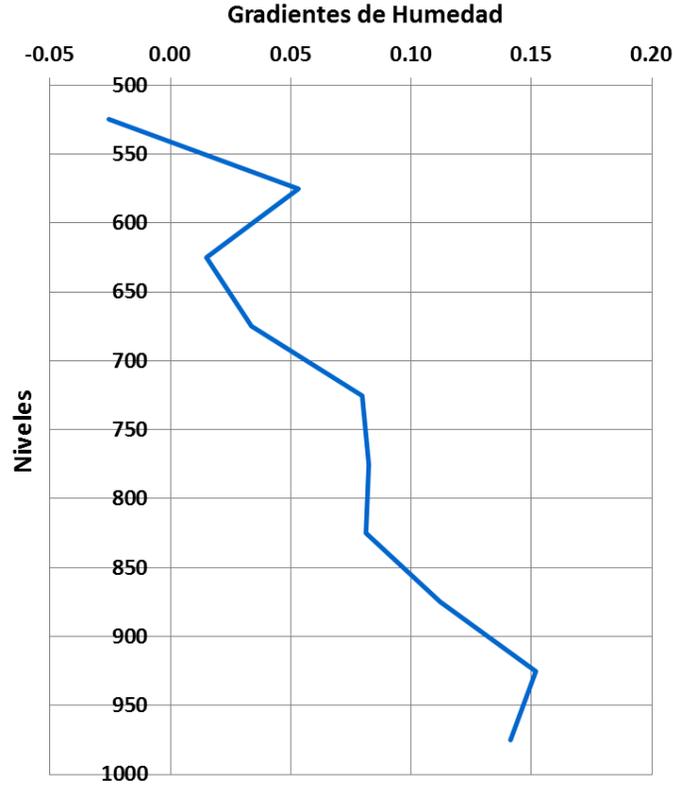


Figura 5. Frecuencia media del gradiente vertical de humedad relativa

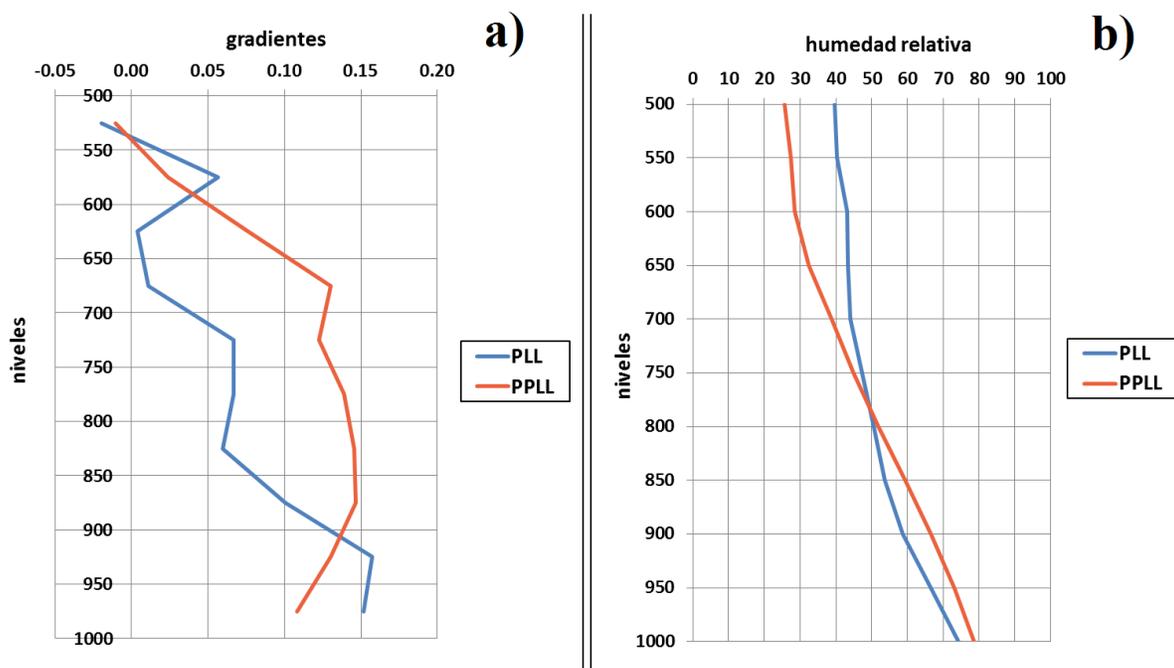


Figura 6. Distribución media del gradiente vertical de humedad relativa (a) y la distribución media de la humedad relativa (b) para cada período

1000 m, en cambio para el PPLL la capa húmeda se localiza hasta los 2000 m de altura. Este resultado se debe al hecho que en el PPLL los tornados ocurrieron principalmente bajo la influencia de sistemas frontales sobre o próximos a la región de estudio, lo que provocó el aumento de la altura de la capa humedad. Otros de los resultados obtenidos fue que la distribución vertical de humedad en niveles bajos fue mayor en el PPLL (Figura 6b), presentando valores más bajos hacia los niveles medios con respecto al PLL.

El análisis de la distribución de humedad mostró que durante la ocurrencia de tornados se presentaba altos valores de humedad relativa en las capas bajas de la tropósfera, con mayores gradientes verticales en los meses del PPLL, aunque en el PLL la humedad relativa fue menor en los niveles bajos con respecto al PPLL, con menores gradientes a partir de los 900 hPa. La presencia de bajos valores de humedad relativa en niveles medios de la

tropósfera en ambos periodos favoreció la intensificación de las corrientes descendentes dentro de las tormentas, con la formación de fuertes frentes de rachas, que propiciaron la intensificación de la vorticidad local.

Condiciones termodinámicas

Otro factor a tener en cuenta en el análisis de las condiciones que favorecen o no la severidad son las características termodinámicas de la atmósfera y su posible evolución. En este sentido se analizó el conjunto CAPE – CIN para las condiciones existentes en el periodo que se reportaron los tornados, y por otra parte, el posible papel que pudieran jugar algunos índices termodinámicos para conocer con antelación las condiciones favorables en el desarrollo posterior de un tornado. Para este análisis se tomaron los sondeos a las 1200 UTC y a las 0000 UTC del día siguiente.

En el PLL la CAPE mostró en el mayor número de casos (27) valores entre 1000 a 2500

J/kg lo que reflejaba condiciones para una convección moderada. En el 100 % de los casos existían condiciones favorables para el ascenso de las partículas desde horas de la mañana, presentando la diferencia entre la CAPE y la CIN valores positivos. El valor medio estuvo en los 2044,6 J/kg. De los 44 casos analizados, sólo 12 casos en este período presentaron condiciones de convección severa, de lo que pudiera inferirse que los tornados en Cuba se desarrollan bajo condiciones de poca a moderada inestabilidad.

En el 100% de los casos en el PLL, el índice LI mostró condiciones de inestabilidad ($LI < 0$), con un 63.6 % que reflejó moderada inestabilidad con posibilidad de fuertes tormentas. La media de este índice para los días de tornados fue de $-4,9^{\circ}\text{C}$. El Índice K en el 34.1% de los casos del PLL reflejaron la posibilidad de un 40 a un 60% de ocurrencia de tormentas. El valor medio fue de $26,3^{\circ}\text{C}$.

A diferencia de los índices expuestos anteriormente, el SI, el SWEAT (destinado a distinguir entre tormentas severas y no severas), así como el TT, no reflejaron ninguna condición de inestabilidad con respecto a los estándares de comportamiento de estas variables tanto para el PLL como para el PPLL.

De manera general, en la mayoría de los casos se reflejaron condiciones en la atmósfera con condiciones entre moderada a baja inestabilidad en el PLL y sólo en pocos casos se encontraron condiciones de alta inestabilidad. Se observó también que hubo un incremento de las condiciones de inestabilidad comparando el sondeo de las 1200 UTC con el de las 0000 UTC del día posteriormente, o sea, las 19:00 horas según el meridiano 75°W de ese mismo día.

En los casos correspondientes al PPLL los tornados se reportaron en diferentes horas del día, en correspondencia con el acercamiento a la región de estudio de sistemas frontales, las

condiciones que reflejaban los sondeos, no siempre reflejaron las condiciones que en realidad se encontraban en la región occidental de Cuba. Es por ello que, de manera general, las condiciones reflejaron estabilidad para casi todos los índices.

Condiciones a mesoescala

Análisis de las observaciones por radar

En la actualidad, el radar meteorológico constituye una de las herramientas principales para el pronóstico a muy corto plazo. La búsqueda de patrones o configuraciones radáricas continúa siendo aún la vía fundamental para los procedimientos de diagnóstico acertados a partir de estudios de casos bien documentados. En la investigación se contó con 17 observaciones de días con reportes de tornados.

En el 90 % de los casos los tornados se originaron dentro de un patrón de multicelda, lo que pone de manifiesto el papel que juega la interacción dinámica de las diferentes celdas que la conforman con su entorno ([Gamboa, 2004](#)), en donde el 45 % se formaron en tormentas dentro de agrupaciones nubosas y el resto en líneas de tormenta.

En el 99 % de los casos los valores de reflectividad relacionada a la tormenta, tanto para el PLL como para el PPLL, estuvieron por encima de 45 dBz, criterio propuesto por [Donaldson \(1965\)](#), como un indicador de potencialidad de tormentas y propuesta en el Complejo Radárico para la Información de Lluvia Localizada (CRAILL) por [Gamboa et al. \(1993\)](#), como indicativo para el pronóstico de fenómenos meteorológicos potencialmente peligrosos, coincidiendo también con lo encontrado por [Acosta & Martínez \(2006\)](#).

Los datos obtenidos de reflectividad, tanto para el PLL como para el PPLL (la que constituye un indicador directo del tamaño y concentración de las partículas de precipitación

dentro de la nube), se encontraron dentro del rango propuesto por [Gamboa \(2004\)](#), donde se encuentra la mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos severos (36,0 – 62,0 dBz). La mediana para el PLL fue de 54,0 dBz, con el valor máximo de 66,0 dBz. Para el PPLL la mediana encontrada en estos casos, fue de 51,5 dBz, inferior al valor encontrado en el PLL y presentó como valor máximo 54,0 dBz.

La altura a la que se encontraba la máxima reflectividad de la columna vertical, tenía como mediana 5,1 km en el PLL y 4,6 km en el PPLL. Para ambos períodos, la mayoría de los casos se encontraron por debajo de los umbrales propuestos por [Gamboa \(2004\)](#), para las TLS (10,7 y 14,0 km). Esto se pudiera relacionar con lo planteado en la literatura especializada que los tornados aparecen en la etapa de disipación de las tormentas (corrientes descendentes) donde la mayor concentración de las gotas de agua corresponden a alturas menores, no así para los granizos que constituyen el eventos severo más frecuentes.

En solo el 25% de los casos en el PLL las alturas máximas de los toques (TM) se encontraban en el rango propuesto por [Gamboa \(2004\)](#), de mayor probabilidad de TLS (14,0 – 17,0 km), con el valor más bajo alrededor de los 2,0 km y la mediana de 10,3 km. En dos de los casos analizados el TM sobrepasó los 15,0 km, altura cercana a la tropopausa ([Aroche et al., 1994](#)). Para el PPLL el valor de la mediana fue de 9,5 km, en sólo un caso sobrepasó los 15,0 km. Para ambos períodos el valor medio fue de 13,3 km. Al parecer para la ocurrencia de los tornados de poca intensidad tan comunes en Cuba, no es necesario que los toques de las tormentas sean tan elevados, esto está en concordancia a lo expresado por [Fujita \(1978\)](#).

El máximo contenido de agua líquida verticalmente integrada (VIL) se ha utilizado operativamente como un indicador de eventos severos, sin embargo, el análisis de esta

variable no mostró significativas deferencias con respecto a su comportamiento para tormentas no severas ([Gamboa, 2004](#)) lo que refleja que esta variable no es muy efectiva en el pronóstico de tornados. Debido a las dificultades presentadas con el VIL, se han desarrollado varios procedimientos a partir de él, identificándose como uno de los más importantes la densidad de la VIL ([Paxton & Shepherd, 1993](#)), que se obtiene normalizando el VIL con la altura del tope. Para la muestra tomada de días con tornados en el PLL, esta variable presentó como valor medio 4,7 g/m³, con una mediana de 3,2 g/m³. El 81,3 % de los casos analizados en este período presentaron valores entre el rango propuesto por [Gamboa \(2004\)](#), como de máxima posibilidad de formación de fenómenos severos. Para el PPLL el valor medio fue de 1,4 g/m³, y la mediana de 1.3 g/m³, y sólo el 25 % de los casos se encontraban dentro del rango de máxima posibilidad de formación de severidad.

El índice IRCP ([Gamboa, 2004](#)), asume que mientras más grande sea su magnitud, mayores pueden ser las intensidades de las corrientes verticales. En el PLL solamente el 18,75 % se encontraban en los umbrales de máxima frecuencia de severidad, con un valor medio de 272,2. En el PPLL el valor medio fue de 219,9 y sólo un caso se encontró entre los umbrales propuestos. De manera general, en los resultados obtenidos se encontraron diferencias entre un período y otro. La mayoría de las variables se comportaron con valores inferiores en el PPLL con respecto al PLL, y en comparación también a los resultados obtenidos por [Gamboa \(2004\)](#). Un resumen de los análisis de los datos por radar se muestra en la [tabla 4](#).

En las escasas imágenes de satélite disponibles en el espectro visible, se observaron que la mayoría de los días que se produjeron los reportes de tornados y cuando no influyeron frente fríos, predominaban en horas de la

Tabla 4. Valores medios obtenidos de las observaciones del radar de Casa Blanca para las celdas asociadas a los tornados

	Nro. casos	PLL				Nro. casos	PPLL			
		media	mediana	Mín	Máx		media	mediana	Mín	Máx
Zmáx.(dBz)	16	52.4	54.0	39.0	66.0	4	50.5	51.5	45.0	54.0
HZ(km)	16	6.2	5.1	2.0	14.3	4	2.9	4.6	2.4	101.0
Vil(kg/m ²)	16	40.4	22.8	5.0	137.0	4	14.5	10.8	8.5	28.0
TM(km)	16	13.3	11.3	1.6	53.0	4	13.3	9.5	7.1	27.0
IRCP	16	272,7	204,6	0,0	873,2	4	218,4	219,9	189	244,8
DV(g/m ³)	16	4.7	3.2	0.3	18.1	4	1.4	1.3	0.4	2.7

mañana los Rollos Convectivos Horizontales (HCRs), de los cuales en su interacción con el frente de brisa de mar o con celdas abiertas se desarrolló la convección profunda, tanto en forma de celdas aisladas como líneas de tormentas.

Conclusiones

La ocurrencia de tornados en las provincias occidentales de Cuba, en cuanto a su origen y condiciones imperantes a escala sinóptica entre los periodos lluviosos y poco lluviosos presentó las siguientes diferencias:

- En el PPLL todos los tornados se presentaron bajo la influencia de sistemas a escala sinóptica que comúnmente generan alguna manifestación de severidad (Aguilar et al., 2009), principalmente los sistemas frontales. En el PLL, a pesar que el 83 % de los casos se desarrollaron igualmente bajo la influencia de patrones sinópticos que generan severidad, en el 17 % de los casos aparentemente no existía condiciones favorables a escala sinóptica para la ocurrencia de tornados, de lo que puede inferirse que las causas debieron estar en las interacciones de sistemas a mesoescala en los niveles bajos.

- A escala sinóptica para el PLL predominó la vorticidad nula sobre la región de estudio, en cambio en el PPLL predominó la vorticidad positiva.
- La capa más húmeda en el PLL se encontró por debajo de los 1000 m, en cambio en el PPLL se encontró por debajo de los 2000 m. Las inversiones de humedad se encontraron en las capas por encima del nivel de 800 hPa, y los mayores gradientes de humedad relativa se encontraron por debajo de los 800 hPa.
- Las condiciones termodinámicas para el PLL mostraron ambientes de moderada inestabilidad, en cambio en el PPLL los sondeos reflejaron un ambiente de baja inestabilidad.

Recomendaciones

- Extender el estudio a las regiones central y oriental de Cuba de la influencia de la vorticidad sinóptica en las condiciones para la formación de tornados.
- Incluir mayor cantidad de estudios de casos con presencia de tornados bajo diferentes condiciones para aumentar el conocimiento de los mecanismos de formación y desarrollo de los mismos.

Referencias

- Acosta, G. & Y. Martínez, 2006. “Los tornados en la región occidental de Cuba. Configuraciones sinópticas que favorecen su desarrollo y características por radar”. <http://www.formun07Instec>.
- Acosta, G., 2008. “Los tornados en Cuba. Análisis de algunas condiciones favorables para su desarrollo dentro del período lluvioso”. Tesis presentada en opción al grado científico de Licenciado en Ciencias Meteorológicas, Instec, 63 pp.
- Aguilar, G.; Carnesoltas, C. M.; Fernández, B. C. & Naranjo, D. L. 2005. “Climatología de las Tormentas Locales Severas en Cuba en el período 1987–2002”. Resultados de la modelación de un caso de estudio”. *Revista Cubana de Meteorología*, 12(1): 3–10, ISSN: 0864-151X.
- Aguilar, G.; Carnesoltas, C. M. & Naranjo, D. L. 2009. “Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Parte I: período poco lluvioso”. *Revista Cubana de Meteorología*, 15(1): 85–108, ISSN: 0864-151X.
- Alfonso, A. 1994. “Climatología de las tormentas locales severas en Cuba. La Habana”, Cuba: Academia, 168 p., ISBN: 959-02-0060-5, Available: https://books.google.com/cu/books/about/Climatolog%C3%ADa_de_las_tormentas_locales_s.html?id=JloxNQAACA AJ&redir_esc=y.
- Aroche, R., J. C. Antuña, & C. Morales, 1994. “Comportamiento de la tropopausa en el PMC. Parte I: Variables aerológicas”. *Ciencias de la Tierra y el Espacio* # 23-24.
- Bunkers, M. J., M. R. Hjelmfelt & P. L. Smith, 2006a. “An observational examination of long-lived supercells. Part I: Characteristics, evolution, and demise”. *Wea. Forecasting*, 21(5), 673–688, ISSN: 0882-8156, DOI: [10.1175/WAF949.1](https://doi.org/10.1175/WAF949.1).
- Bunkers, M. J., J. S. Johnson, L. J. Czepyha, J. M. Grzywacz, B. A. Klimowski, & M. R. Hjelmfelt, 2006b. “An observational examination of long-lived supercells. Part II: Environmental conditions and forecasting”. *Wea. Forecasting*, 21(5), 689–714. ISSN: 0882-8156, DOI: [10.1175/WAF952.1](https://doi.org/10.1175/WAF952.1).
- Carnesoltas, M.; Aguilar, G. & Naranjo, L. 2010a. “Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de Tormentas Locales Severas en Cuba. Parte II, periodo lluvioso”. *Revista Cubana de Meteorología*, 16(1): 13–31, ISSN: 0864-151X.
- Carnesoltas, M.; Sierra, M.; Rabelo, D. & Fernández, E. 2013. “Factores físicos que influyen en la caída de Granizos y en las Aeroavalanchas sobre Cuba”. Informe de Revista Cubana de Meteorología, Resultado, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología, 65 p.
- Doswell, C.A. III, 1993. “Flash-flood producing convective storms: current understanding and research. Proc. US-Spain Workshop on Natural Hazards”. J. Corominas and K.P. Georgakakos Ed. Barcelona, 8-11 June. pp. 97-107.
- Davies, J. M., 2002. “On low-level thermodynamic parameters associated with tornadic and non-tornadic supercells”. Preprints, 21st Conf. Severe Local Storms, San Antonio, TX, *Amer. Meteor. Soc.*, 603-606 pp.
- Davies, J. M., 2004. “Estimations of CIN and LFC associated with tornadic and nontornadic supercells”. *Wea. Forecasting*, 19(4), 714-726 pp, ISSN: 0882-8156, DOI: [10.1175/1520-0434\(2004\)019<0714:EOCALA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0714:EOCALA>2.0.CO;2).
- Donaldson, R. J., 1965. “Methods for identifying Severe Thunderstorm by radar:

- A Guide and bibliography”, Bull. Amer. Meteor. Soc, 46, 174 – 193 pp.
- Fujita, T.T. & A.D.Pearson, 1973. “Results of FPP classification of 1971 and 1972 tornadoes”. Preprints, 8th Conf on Severe Local Storms, Denver, Amer. Meteor. Soc. p. 142-145.
- Fujita, T. T., 1978. “Manual of downburst identification for project Nimrod”. Satellite and Mesometeorology Research Paper 156, Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago, 104 pp. [NTIS PB-286048.]
- Gamboa, F., 2004. “Selección de indicadores radáricos como productores de severidad”. Tesis en Opción al Título Académico de Máster en Ciencias Meteorológicas. Instituto Superior de Ciencias Aplicadas.
- Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, 55 pp.
- Gamboa, F.; W. Vázquez, O. Rodríguez, C. Pérez & R. Aroche, 1993. “Complejo Radárico Automático para la información de Lluvia Localizada (CRAILL)”. [Inédito] Informe Científico al INSMET.
- Paxton, C. H. & J. M. Shepherd, 1993. “Radar Diagnostic Parameters as indicators of Severe Weather in central Florida”. NOAA Tech. Memo. NWS SR-149, 12 pp
- Rasmussen, E. N., 2003. “Refined supercell and tornado forecast parameters”. Wea. Forecasting, 18(3), 530–535, ISSN: 0882-8156, DOI: [10.1175/1520-0434\(2003\)18<530:RSATFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)18<530:RSATFP>2.0.CO;2).