

Verificación de la formación de tormentas superceldas bajo las condiciones tropicales e insulares de Cuba



<https://cu-id.com/2377/v31n3e04>

Verification of the formation of supercell storms under the tropical and insular conditions of Cuba

✉ Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés^{1*}, ✉ Alis Varela de la Rosa², ✉ Elier Pila Fariñas²,
Mario Carnesoltas Calvo², ✉ Rafael Valdés Alberto³

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), Universidad de la Habana (UH), Cuba.

²Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), Cuba. E-mail: alis.varela@insmet.cu, elier.pila@insmet.cu, mario.carnesoltas@insmet.cu

³Centro Nacional de Radares Camagüey, Cuba. E-mail: rafael@radares.insmet.cu

RESUMEN: Las tormentas superceldas representan la forma más organizada de convección profunda que se generan en la atmósfera. En Cuba se considera poco probable su formación debido a la configuración tropical e insular que existe en el área geográfica, aunque no se descarta la posibilidad de que estas se produzcan de manera aislada bajo determinadas condiciones. La investigación tuvo como objetivo verificar la formación de tormentas superceldas bajo las condiciones tropicales e insulares de Cuba. Se seleccionaron cinco casos de estudio teniendo en cuenta eventos y patrones severos que puede describir una tormenta supercelda. Se analizaron las condiciones sinópticas de estos días, así como imágenes del satélite meteorológico GOES 16 y observaciones del radar meteorológico, además a partir del modelo de pronóstico numérico del tiempo RAP se extrajeron los datos para analizar las dos teorías referentes a la cizalladura y su influencia en la formación de rotación dentro de las superceldas. Como resultados no se pudo verificar la presencia de tormentas superceldas bajo las condiciones tropicales e insulares de Cuba, sin embargo, si se encontró la presencia de tormentas con dimensiones similares a las superceldas formadas en latitudes medias.

Palabras clave: condiciones tropicales, superceldas, vorticidad horizontal.

ABSTRACT: Supercell storms represent the most organized form of deep convection that occurs in the atmosphere. In Cuba, their formation is considered unlikely due to the tropical and insular configuration that exists in the geographic area, although the possibility of these occurring in isolation under certain conditions is not ruled out. The objective of the research was to verify the formation of supercell storms under the tropical and island conditions of Cuba. Five case studies were selected considering severe events and patterns that a supercell storm can describe. The synoptic conditions of these days were analyzed, as well as images from the GOES 16 meteorological satellite and observations from the meteorological radar. In addition, data were extracted from the RAP numerical weather forecast model to analyze the two theories regarding shear and its influence on the formation of rotation within supercells. As results, the presence of supercell storms could not be verified under the tropical and island conditions of Cuba, however, the presence of storms with dimensions similar to the supercells formed in mid-latitudes was found.

Keywords: horizontal vorticity, supercells, tropical conditions.

*Autor para la correspondencia: Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés, e-mail: anyidisotuar2006@gmail.com

Recibido: 16/09/2024

Aceptado: 06/08/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de autoría: **Conceptualización de la idea:** Lic. Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés, Dr. Mario Carnesoltas Calvo & MSc. Alis Varela de la Rosa. **Supervisión de la investigación:** MSc. Alis Varela de la Rosa. **Obtención, procesamiento y análisis de datos:** Lic. Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés, MSc. Alis Varela de la Rosa, MSc. Elier Pila Fariñas & MSc. Rafael Valdés Alberto. **Investigación:** Lic. Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés. **Metodología:** Lic. Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés & MSc. Alis Varela de la Rosa. **Redacción y edición:** Lic. Anyelis de la Caridad Disotuar Rodés & MSc. Alis Varela de la Rosa.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

Las superceldas constituyen un fenómeno de la mesoescala, característico de latitudes medias, que representa la forma más organizada, severa y de larga duración de la convección profunda aislada (Quirantes, 2014). Se forman a partir de nubes convectivas, tipo Cumulonimbus (Cb), con gran desarrollo vertical que pueden estar asociadas a efectos locales o formar parte de un sistema más amplio. La principal característica que poseen es la presencia de un profundo y persistente mesociclón, el cual no es más que una corriente ascendente profunda y en constante rotación con una altura aproximada entre 5-8 km (Doswell & Burgess, 1993).

Las superceldas, a pesar de tener gran variedad de características, pueden clasificarse en tres categorías de acuerdo con la cantidad y distribución espacial de la precipitación (Stull, 2015) de la siguiente forma:

- Supercelda de baja precipitación (LP, *low precipitation*, por sus siglas en inglés)
- Supercelda clásica (CL, *classic*, por sus siglas en inglés)
- Supercelda de precipitación alta (HP, *high precipitation*, por sus siglas en inglés)

Sobre esta clasificación, Stull (2015) agregó que las tormentas que reúnan características de estas tres categorías de superceldas o que tengan características de superceldas pero que no puedan incluirse en alguna de estas clasificaciones son nominadas como tormentas híbridas.

Existe además un tipo de supercelda con dimensiones inferiores, tanto horizontal como verticalmente, las cuales son conocidas como mini-superceldas o supercelda con topes de eco más bajos (Wicker & Cantrell, 1996). El mesociclón en estas tormentas generalmente se encuentra ubicado entre los 6-7 km de altura y un diámetro menor a 4 km, teniendo en cuenta los términos de Fujita (1985).

Muchas son las investigaciones realizadas sobre las superceldas, fundamentalmente en latitudes medias donde se ha comprobado su existencia tal es el caso de Quirantes *et. al* (2004); en bajas latitudes como los trópicos son deficientes los estudios referidos a estas tormentas, pues no se ha comprobado la ocurrencia de tal fenómeno mesoescalar. En Cuba, de forma general, no existe una investigación capaz

de verificar la ocurrencia de este fenómeno ya que se considera poco probable su formación debido a las condiciones tropicales e insulares que predominan en el territorio; sin embargo, no se descarta la posibilidad de que ocurran de forma aislada bajo determinadas condiciones. Asimismo, no se rechaza la posibilidad de que puedan existir tormentas con características de minisuperceldas o inclusive tormentas que presenten dimensiones aún más pequeñas. De aquí que el **objetivo** de la investigación fue verificar la formación de tormentas superceldas bajo las condiciones tropicales e insulares de Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestra de estudio

Los casos seleccionados en esta investigación se extrajeron de forma intencionada, luego de una amplia búsqueda en la tabla de reportes de TLS, la cual es confeccionada por los especialistas del Centro de Pronóstico del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET) y cuyas fuentes principales provienen de la red de estaciones meteorológicas de superficie del INSMET y de aficionados. En la búsqueda de los casos de estudios se contó con la ayuda y asesoramiento de los especialistas del Centro Nacional de Radares en Camagüey, a la hora de considerar los eventos y patrones severos que pudieran describir una tormenta supercelda. Además, se tuvo en cuenta la disponibilidad de todas las herramientas necesarias para un correcto análisis de cada caso y así cumplir con el objetivo planteado en esta investigación. Finalmente se escogieron un total de cinco casos de estudio comprendidos entre los años 2016 y 2019, los cuales se muestran en la [tabla 1](#).

Metodología empleada

Los mapas de reanálisis se extrajeron a partir de los datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y del Physical Sciences Laboratory (PSL). Se analizaron los mapas de altura geopotencial en los niveles de presión: 200 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa y de 1000 hPa, para los horarios de las 1200 UTC y 1800 UTC, correspondientes a cada caso de estudio para conocer si las condiciones sinópticas contribuían con suficiente inestabilidad en la formación de las tormentas.

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados para la investigación

Fecha	Evento severo	Hora de reporte (UTC)	Ubicación	Provincia
30/5/2016	Granizo	15:00-15:20	Sancti Spiritus	Sancti Spiritus
24/7/2017	Tornado	13:30-13:37	Niquero	Granma
18/4/2017	Granizo	17:30-17:35	Manzanillo	Granma
26/5/2018	Granizo	21:07-21:20	Ciego de Ávila	Ciego de Ávila
2/5/2019	Tornado	16:00	Venezuela	Ciego de Ávila

Las imágenes de satélite meteorológico se obtuvieron a través de los satélites meteorológicos GOES 13 y GOES 16, tanto en el canal visible como en el infrarrojo, puesto que las tormentas ocurrieron entre horas de la tarde y la noche. Para los casos de estudio comprendidos entre el 2016 y 2017 se emplearon las imágenes del satélite correspondientes al GOES 13, mientras que para los casos comprendidos entre el 2018 y el 2019 se utilizaron las imágenes del GOES 16. Con estas observaciones se pudo identificar rasgos característicos de acuerdo a la nubosidad de tormentas severas. También se determinó la posición, evolución, así como movimientos y velocidad de traslación de cada una de las tormentas escogidas.

A partir del Sistema de Modelación de Pronóstico Numérico del Tiempo Rapid Refresh (RAP por sus siglas en inglés) se determinó los campos de la cizalladura vertical del viento en los primeros 6 km de altura y la dirección media del flujo en las capas bajas, para determinar si el ambiente era propicio para la formación de las superceldas. Con los datos extraídos del modelo se confeccionaron hodógrafas, para conocer el comportamiento de la cizalladura vertical del viento en la columna troposférica. Las observaciones de radar correspondientes a los casos de estudio, fueron facilitadas por el equipo del Centro Nacional de Radares en Camagüey. El radar utilizado en todos los días seleccionados fue el de Camagüey; debido a la localización de cada caso, los que siempre estuvieron dentro de los radios óptimos del mismo.

Para el procesamiento de las imágenes de radar se utilizó el software Vesta Proceso en su versión 5.3.19.4, a partir del cual se analizaron determinadas características de las superceldas y un grupo de variables radáricas que permitieron determinar la evolución, desarrollo y estructura interna de la tormenta. Además, se determinó la posición y movimiento de cada celda convectiva contenida en las mismas.

A continuación, se describen las características de las superceldas mediante las imágenes de radar según Quirantes (2014):

- Nuevos desarrollos que se producen en la parte derecha de la tormenta, con velocidades ascensionales superiores a los 25 m/s.
- Valores de reflectividad superiores a los 60 dBz, al menos durante 50 minutos generalmente concentrados en los niveles medios-altos.
- Estructura de gancho en la horizontal asociada a la precipitación descendente, esto indica que el mesociclón se ha formado en niveles medios.
- Región de eco débil en niveles altos, rodeada de una zona de ecos en forma de gancho.
- Zonas de elevados valores de reflectividad concentrados a más de 12 km de altura. En el caso de las minisuperceldas puede ser menor.

- Altos valores en el contenido de agua líquida verticalmente integrado (VIL, Vertical Integrated Liquid).
- Muesca en forma de V que se forma corriente abajo del viento en niveles medios-altos.

Las principales variables radáricas analizadas se mencionan a continuación, las cuales fueron extraídas de Gamboa (2004):

Reflectividad máxima (ZM): Esta variable constituye la mayor reflectividad (Z) del volumen de la celda comprendido entre 1 y 20 km, en el instante de la observación. La Z se obtiene de la proyección en el plano XY, del máximo valor de reflectividad, alcanzado en cada columna del volumen cartesiano. La cual se puede representar matemáticamente de la siguiente forma:

$$ZM(x, y) = Máx Z(x, y, z) \quad (1)$$

Mayor Altura de Z máxima en la columna (HZ): Los valores máximos de Z en cada columna del volumen cartesiano, están a diferentes alturas. HZ es la mayor altitud de esos valores máximos, es decir, que esta variable se toma de la representación plana de la altura que tiene el valor máximo de reflectividad en cada punto (x, y). Se representa como:

$$HZ_{(x,y)} = Máx H_Z \quad (2)$$

Máximo contenido de agua líquida verticalmente integrada (VM): es el contenido de agua líquida verticalmente integrada (VIL) máximo del área y constituye una medida radárica del contenido potencial del agua líquida precipitable por m² dentro de una nube (Greene & Clark, 1972). Su magnitud y distribución espacial indican el grado de condensación y desarrollo que ha tenido lugar. A mayor contenido de agua líquida y altura de la nube, se obtiene mayor VIL y por tanto mayores corrientes ascendentes para mantener valores de reflectividades en niveles altos (Gamboa, 2004). Esta se mide en kg/m² y puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$VIL = SUM \ 3.44 \cdot 10^{-6} \left[\frac{(Z_i + Z_{i+1})}{2} \right]^{4/7} dh \quad (3)$$

Donde SUM representa la integral en altura desde la base inferior a la superior del volumen radar considerado y $Z_i + Z_{i+1}$ son los valores de reflectividad (mm⁶ m⁻³) en las capas separadas por un espesor dh.

Altura máxima del tope de la tormenta (TM): es la representación plana de la máxima altura que alcanzan los ecos superiores a los 10 dBz dentro del volumen cartesiano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Situación sinóptica

De manera general, en todos los días analizados, las condiciones sinópticas fueron favorables para el desarrollo de la actividad convectiva en cada región de estudio. Marcada por una configuración sinóptica que a grandes rasgos impuso vientos del segundo y tercer cuadrante en las capas bajas de la troposfera, los cuales favorecían la advección de humedad relativa y calor desde el mar Caribe.

Imágenes de satélite

Durante el análisis a través de las imágenes de satélite meteorológico se pudo determinar la hora de inicio de las tormentas estudiadas, así como la hora en que alcanzaron su máximo desarrollo y el estado de disipación. Se identificó la presencia de potentes cumulonimbos (Cb) en todos los casos analizados, los que sobresalían con topes fríos y penetrantes, lo que se evidenciaba en una mayor temperatura de brillo respecto a la nubosidad convectiva presente en sus inmediaciones; así como una textura suficientemente densa para generar una sombra en la nubosidad de menor extensión. La presencia de estos topes evidencia las intensas corrientes ascendentes que soportaban a estas tormentas. En la [figura 1](#) se muestra la existencia de topes fríos y penetrantes en la tormenta correspondiente al caso del día 18 de abril de 2017 en Manzanillo, Granma.

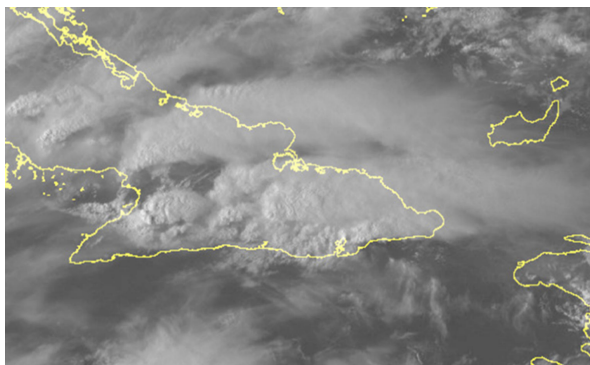


Figura 1. Imágenes de satélite meteorológico del día 18 de abril de 2017 a las 2115 UTC

A partir de las imágenes de satélite también se pudo identificar la formación, desde horas tempranas de la mañana de Rollos Convectivos Horizontales (HCR por sus siglas en inglés). La orientación de estas estructuras coherentes permitió comprobar que el régimen de viento en las capas bajas de la troposfera en la gran mayoría de los casos era del suroeste y del sudeste, coincidiendo con lo encontrado en el análisis sinóptico.

En los casos analizados, exceptuando el día 24 de julio de 2017, se encontró que la interacción de estos (HCR) con los frentes de rachas y con el frente de brisa de mar; contribuyó a incentivar la convección profunda a nivel mesoescalar, lo cual anteriormente fue identificado por [Carnesoltas \(2002\)](#) y [Varela \(2017\)](#). Este último autor planteó que “la interacción de los HCR, con una superficie de discontinuidad, constituye el principal mecanismo en la formación de la convección profunda en horas de la tarde sobre Cuba”. En la [figura 2](#) se puede observar la existencia de HCR desde horas tempranas de la mañana del día 2 de mayo del 2019, mientras en la [figura 3](#) el resultado de la interacción de los HCR y el frente de brisa de mar el día 30 de mayo del 2016.

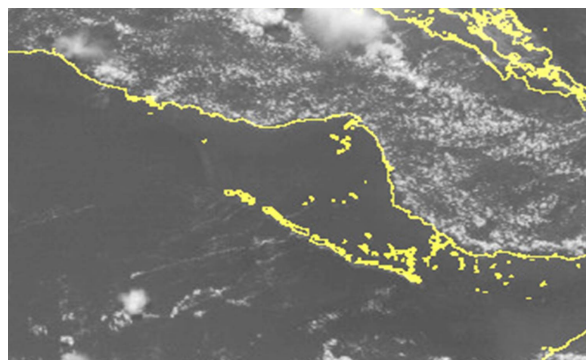


Figura 2. Imágenes de satélite meteorológico del día 2 de mayo del 2019 a las 1730 UTC

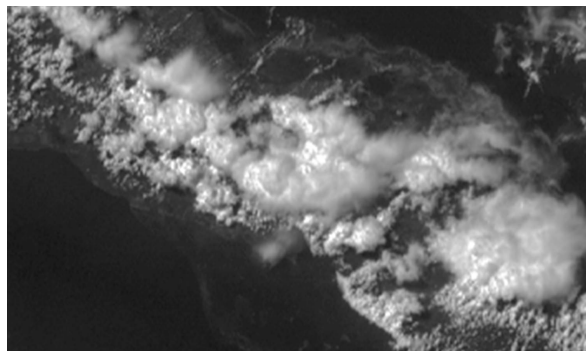


Figura 3. Imagen de satélite meteorológico del día 30 de mayo de 2016 a las 1915 UTC

De manera general, a partir de las imágenes de satélite meteorológico se encontró que las condiciones sinópticas existentes, que aportaban gran inestabilidad sobre el territorio nacional, combinadas con los factores locales, como la interacción de los HCR y el frente de brisa de mar, pudieron incentivar tormentas de gran desarrollo convectivo con la presencia de topes fríos y penetrantes. Las características encontradas en las tormentas analizadas son muy típicas de encontrar dentro de la nubosidad que se desarrolla sobre Cuba la mayoría de las tardes, sobre todo del periodo lluvioso del año, sin encontrarse evidencias que ellas fuesen superceldas.

Análisis de las observaciones de radar

Máxima reflectividad (Z) en la tormenta

En las observaciones del radar meteorológico se observó que el horario de reportes de los eventos severos en las tormentas estudiadas correspondió con los de máxima reflectividad (Z) presentes a lo largo del tiempo de vida de cada una de ellas. De manera general los valores de máxima Z oscilaron entre los 57 dBz y 70 dBz, como se puede apreciar en la [tabla 2](#). Según [Gamboa \(2004\)](#), esta variable radárica constituye un indicador del tamaño y concentración de las partículas dentro de la nube de tormenta; mientras mayor sea su valor, la tormenta estará asociada a una fuerte corriente ascendente capaz de sustentar partículas de gran tamaño.

Tabla 2. Valores de máxima reflectividad encontrados en cada una de las tormentas de los casos analizados y la altura donde fueron encontrados dentro de ellas.

	Máx Z(dBz)	Altura de Z máx (km)
30/5/2016	59	3.2
18/4/2017	70	5
24/7/2017	60	9
26/5/2018	61	5.6
2/5/2019	57	6.6

Según [Castro et al. \(1989\)](#), las superceldas en latitudes medias, pueden ser reconocidas en las imágenes de radar si presentan valores de reflectividad superiores a los 45 dBz, al menos durante 50 minutos. Sin embargo, [Quirantes \(2014\)](#), establece que los valores de reflectividad suelen ser muy elevados en este tipo de tormentas con ecos iguales o superiores a los 60 dBz, generalmente concentrados en los niveles medios-altos dentro de nube. En los trópicos, la dinámica de las tormentas es diferente a la de latitudes medias, es por ello que una tormenta incentivada por factores locales, como ocurre en Cuba, puede alcanzar fácilmente valores de reflectividad en el radar superior a los 45 dBz ([Gamboa, 2004](#)). Por ello, la clasificación más aceptada a utilizar para Cuba, donde prevalecen condiciones tropicales e insulares, es la de [Quirantes \(2014\)](#).

Teniendo en cuenta esta clasificación, en la muestra analizada se registraron reflectividades superiores a los 60 dBz en tres de estas tormentas, aunque las restantes alcanzaron valores muy cercanos, como se puede observar en la [tabla 2](#). Solo de ellas, en la tormenta del 24 de julio de 2017 fue posible localizar en niveles medios su máximo Z, específicamente con un valor de 60 dBz a 9 km, como se refleja en la [figura 4](#). En las restantes tormentas analizadas, las alturas de los máximos de reflectividad en las nubes variaron entre los 5 km y los 6.6 km, exceptuando el día 30 de mayo de 2016 donde el máximo de Z se encontró en los 3.2 km.

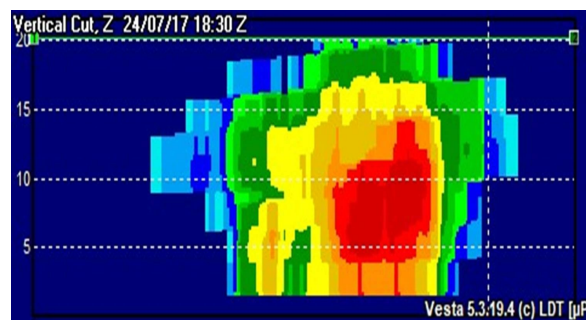


Figura 4. Corte vertical de la tormenta del día 24 de julio de 2017 a las 1830 UTC

Respecto a la duración de los valores máximos de reflectividad, en las tormentas de estudio, se comprobó que solo los casos del día 18 de abril y 24 de julio, ambos del 2017 sostuvieron reflectividades superiores a los 60 dBz, como mínimo durante 50 minutos. En el primer día mencionado fue mantenido estos valores de reflectividad por 100 minutos y en el segundo caso por 50 minutos.

La [figura 5](#) muestra un corte vertical realizado a la tormenta del día 18 de abril de 2017 a las 2210 UTC, momento en que alcanza su máximo valor de reflectividad de 70 dBz a una altura de 5 km. Este valor refleja la presencia de grandes volúmenes de agua dentro de la nube, lo que evidencia la presencia de fuertes corrientes capaz de mantener partículas de gran tamaño por un prolongado tiempo.

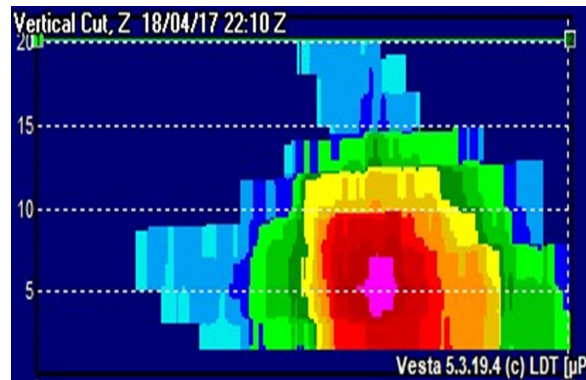


Figura 5. Corte vertical realizado a la tormenta del día 18 de abril de 2017 a las 2210 UTC

De acuerdo con [Zipser & Lutz \(1994\)](#) la intensidad de las corrientes ascendentes en las celdas convectivas determina la distribución vertical de la reflectividad en la misma. Por tanto, estos valores tan elevados encontrados en las tormentas analizadas demuestran la presencia de fuertes corrientes dentro la tormenta, que llevaron a la formación de topos penetrantes observados en las imágenes de satélite.

En el procesamiento de los datos, solo fue posible encontrar un pequeño eco en forma de gancho el 24 de julio de 2017. Esta configuración se observó específicamente en el corte horizontal realizado a los 8 km de altura, como se puede ver en la [figura 6 \(derecha\)](#).

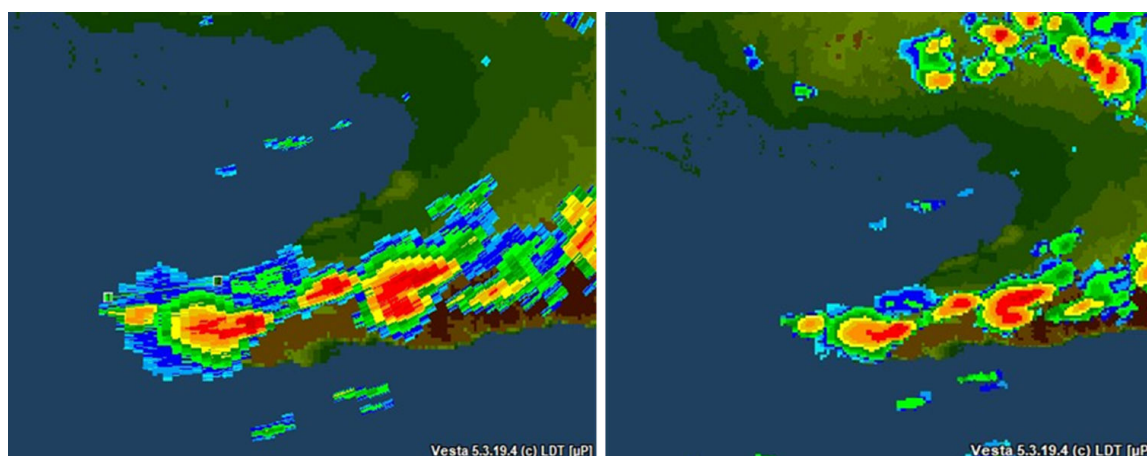


Figura 6. Producto máximo de las observaciones por radar del día 24 de julio de 2017 a las 1850 UTC (izquierda) y corte horizontal a la altura de 8 km del día 24 de julio de 2017 a las 1850 UTC (derecha)

Aunque la presencia de un mesociclón en una tormenta supercelda es fundamental para definirlas, este fundamentalmente puede ser comprobado mediante el radar Doppler; sin embargo, [Quirantes \(2008\)](#) planteó que estos pueden estar ubicados en la curvatura del gancho donde se muestra una zona de eco débil. No obstante, esta no resulta una definición exacta de lo que ocurre en todas las superceldas, ya que la presencia de este patrón no garantiza la presencia de este tipo de tormentas severas.

En caso del patrón encontrado el 24 de julio de 2017 al parecer corresponde a un pequeño eco en gancho de acuerdo con su forma. Sin embargo, en realidad debe estar asociado a una mesobaja en los niveles medios, muy difícil de comprobar con las herramientas que se dispone.

Altura del tope máximo de la nube

[Chatterjee \(1989\)](#) estableció como umbral para identificar los ecos de tiempos severos el de 12 km de altura del tope, sin embargo, en Cuba, [Gamboa et al. \(1993\)](#) establecieron como umbral para la identificación de ecos asociados a fenómenos meteorológicos potencialmente peligrosos en Camagüey a aquellos topes superiores a los 8 km de altura.

Teniendo en cuanto lo antes mencionado, las tormentas estudiadas alcanzaron desarrollos verticales de gran extensión, encontrándose alturas máximas de los topes entre 14 km y 19.8 km, como se observa en la [tabla 3](#). De acuerdo con los resultados descritos anteriormente, la altura de los topes guardó una estrecha relación con aquellas tormentas que mostraron los mayores valores de reflectividad. Esto se debe a que esta variable constituye un indicador del grado de desarrollo de la convección o una medida en la intensidad de las corrientes ascendentes que pueden mantener, en mayor o menor tiempo, a grandes masas de partículas líquidas y/o sólidas en altura ([Gamboa, 2004](#)).

Tabla 3. Resumen de los valores más representativos de las variables radáricas analizadas en cada uno de los casos de estudio

Fecha	Máx Z(dBz)	Altura de Z máx (km)	Tope (km)	VIL (kg/m ²)
30/5/2016	59	3.2	15.0	147
18/4/2017	70	5.0	19.8	226
24/7/2017	60	9.0	19.8	135
26/5/2018	61	5.6	14.0	97
2/5/2019	57	6.6	15.2	57

Según [Quirantes \(2008\)](#), los topes máximos de las tormentas superceldas clásicas se encuentran entre 15 y 20 km de altura. De las celdas convectivas analizadas en esta investigación cuatro alcanzaron valores iguales o superiores a los 15 km, excepto la tormenta correspondiente al 26 de mayo de 2018, la cual solo alcanzó una altura de 14 km de tope máximo. En el caso particular del 24 de julio de 2017 la tormenta alcanzó una altura de aproximadamente 20 km, pero según lo mostrado en el corte vertical realizado a la misma, puede que haya alcanzado dimensiones algo superiores.

[Atlas \(1963\)](#) demostró la correlación que existe entre la altura del tope y la ocurrencia de granizadas en tierra, concluyendo que los ecos, cuyos topes alcanzan la tropopausa, tienen una alta probabilidad de contener granizos, lo que fue corroborado por [Donaldson \(1965\)](#). Lo antes mencionado se pudo comprobar en dos de los casos de granizos de la muestra examinada, en cuyos casos las tormentas alcanzaron la mayor altura de los topes máximos analizados, alcanzando los 20 km.

Contenido de agua líquida verticalmente integrada (VIL)

En los casos de estudio, los valores del VIL se encontraron entre 57 kg/m² y 226 kg/m², como se representa en la [tabla 3](#). Las mayores concentraciones de esta variable se encontraron los días 30 de mayo

de 2016, 24 de julio de 2017 y 18 de abril de 2017; siendo el más alto en este último de 226 kg/m² en la localidad de Manzanillo (figura 7).

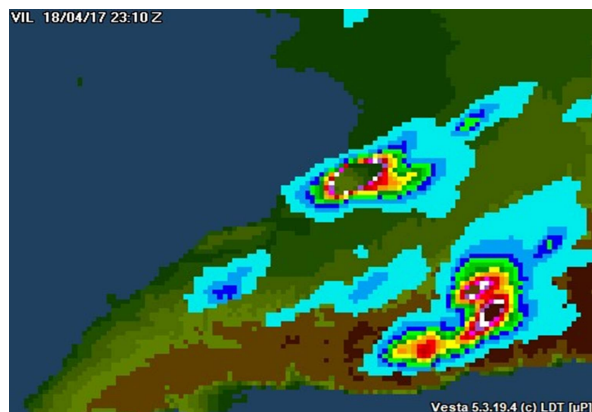


Figura 7. Máximo valor del contenido de agua líquida verticalmente integrado (VIL), registrado el 18 de abril de 2017

De acuerdo con los resultados obtenidos para esta variable, se puede decir que los días donde las tormentas registraron los mayores valores del VIL, estas contaban con intensas corrientes ascendentes, que les permitió que grandes cantidades de agua líquida fueran sostenidas dentro de la tormenta, además dos de estas celdas convectivas fueron las de mayor tope y reflectividad máxima (18 de abril de 2017 y 24 de julio de 2017).

La [tabla 3](#) resume los valores más representativos del análisis a través del radar. De acuerdo con lo expuesto en cada variable radárica los casos estudiados contaban con las características necesarias para producir eventos severos. Solo las tormentas correspondientes al 18 de abril del 2017 y al 24 de julio de 2017, contaban con características que podrían inferir la posibilidad de tormentas parecidas a las superceldas, por lo menos, con umbrales de las variables radáricas muy similares a las tormentas encontradas en las latitudes medias.

Sin embargo, es necesario destacar que como estas tormentas se originaron en un clima tropical, donde las condiciones termodinámicas son diferentes a las encontradas en latitudes medias, no necesariamente tienen que ser estrictamente similares a las de estas latitudes. Además, no se encontró una clara evidencia de la presencia de un mesociclón en los niveles medios de estas tormentas, la principal característica de las superceldas.

Análisis de la vorticidad y cizalladura del viento a través del modelo numérico

Para conocer si las condiciones del ambiente fueron favorables para el desarrollo de tormentas superceldas, se analizó el comportamiento de la cizalladura del viento y la vorticidad horizontal en los entornos de la tormenta. Según [Weisman & Rotunno \(2000\)](#),

existen dos teorías referentes a la cizalladura y su influencia en la formación de rotación dentro de las superceldas.

Análisis de la primera teoría

Según [Rotunno & Klemp \(1982, 1985\)](#), la primera teoría se fundamenta en los procesos mediante los cuales una corriente ascendente interactúa con un entorno de cizalladura vertical para producir un estado quasi-estacionario de una tormenta en rotación. En la investigación se analizó la cizalladura del viento en los primeros 6 km de altura para los cinco casos de estudio; dividiendo el análisis en tres capas dentro de estos niveles: desde 1000 hPa hasta los 850 hPa, desde 1000 hPa hasta los 700 hPa y finalmente hasta 500 hPa. Estos valores se muestran en la [tabla 4](#).

Tabla 4. Valores de la cizalladura vertical del viento (10^{-3} s^{-1}) en diferentes niveles de la tropósfera de los casos de estudio

	Shear 1000-850 hPa	Shear 1000-700 hPa	Shear 1000-500 hPa
30/05/2016	1,06	0,41	1,02
18-04-2017	3,24	1,54	3,63
24-07-2017	2,76	0,45	0,76
27-05-2018	9,01	4,56	2,64
02-05-2019	3,46	1,35	0,88

De acuerdo con la teoría analizada, para la formación de superceldas es necesario que existan valores de cizalladura vertical del viento superiores a los $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ en los primeros 6 km de la atmósfera, condición que no se encontró en ninguno de los días analizados. De las tormentas estudiadas solo una de ellas se encontraba en un ambiente con valores de cizalladura vertical del viento entre 3.0 y $5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ hasta los 6 km de altura, umbral que según [John \(1990\)](#) representa una tendencia moderada a la organización dentro de la celda convectiva.

Como se observa en la [tabla 4](#), los mayores valores de la cizalladura vertical del viento se encontraron en la capa de 1000-850 hPa, que comprende a las condiciones en la Capa Fronteriza Atmosférica (CFA), sobresaliendo en el caso del 26 de mayo de 2018 donde se alcanzó un valor de $9.01 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. En este caso en particular, los altos valores de cizalladura fueron reflejo de la confluencia que existió en las capas bajas sobre la región central de Cuba, debido con la amplia circulación de la tormenta tropical Alberto y la periferia anticiclónica. Como estos valores de cizalladura no se mantuvieron hasta los 6 km, no garantizaba suficiente rotación en el ambiente para que la tormenta la asimilara y así poder convertirse en una supercelda ([Quirantes, 2014](#)). En el resto de los casos, que los mayores valores de la cizalladura vertical del viento se encontrarán por debajo de la base de la nube, contribuyó positivamente a la intrusión de aire a la nube y así al fortalecimiento de las corrientes dentro de la tormenta.

Esto refleja que “la intensidad de la cizalladura en la CFA podía ser un factor que influyera en el flujo de entrada de las celdas convectivas, pero no la formación de una supercelda” (Carnesoltas comunicación personal).

De forma general, en los días analizados, las condiciones ambientales alrededor de la tormenta no fueron idóneas para la evolución de estas a superceldas, de acuerdo con la teoría planteada por Markowski & Richardson (2010). Siempre considerando y coincidiendo con lo planteado con los mencionados autores, que la cizalladura vertical del viento constituye un requisito fundamental para el desarrollo de una tormenta convectiva luego de haberse iniciado, antes de esto puede ser un factor negativo en la misma.

Análisis de la segunda teoría

La segunda teoría centra su análisis en la dirección que presenta el movimiento de la tormenta con respecto a la vorticidad horizontal del ambiente, para poder ser o no incorporada a la rotación interna de la nube. Esta vorticidad puede dividiéndose en “vorticidad paralela” o “vorticidad perpendicular”. Esta teoría postula la existencia de un estado fijo de propagación de la tormenta, y a partir de ahí, considera que los movimientos de la misma conducen a la generación de una corriente ascendente en rotación, debido a la inclinación de un vórtice horizontal existente en el entorno previo (Davies-Jones 1984).

Al realizar el análisis de la teoría de la “vorticidad paralela”, se tuvo en cuenta que la rotación de la corriente ascendente se produce cuando el vector diferencia ($V - c$) se encuentra orientado en el mismo sentido que el vector de la vorticidad vertical (w). Teniendo presente esta idea,

los resultados arrojaron de manera general, que en cuatro de los casos analizados no existían condiciones donde la vorticidad horizontal pudiera ser incorporada a la corriente de la tormenta. En el caso del 24 de julio de 2017 (figura 8, derecha), aunque la orientación del vector w con el vector ($V - c$) no se encuentran posicionados estrictamente de forma paralela, si mostraron una tendencia más hacia el paralelismo que a la perpendicularidad de los mismos.

Se debe tener en cuenta en este análisis, el margen de error que pueden tener los datos al ser extraídos del modelo utilizado, así como los incorporados al procesar las observaciones del radar en el software Vesta Proceso. De acuerdo con lo antes mencionado, en el caso de 24 de julio de 2017 el movimiento de la celda convectiva pudo ser capaz de incorporar rotación adicional a su corriente ascendente mediante la inclinación de los vórtices horizontales generados por la cizalladura vertical del viento del ambiente. Sin embargo, los valores de esta variable en el ambiente eran muy pequeños, por lo que podría significar que la asimilación adicional de rotación en la celda convectiva, solo contribuyó al fortalecimiento de la misma, logrando alcanzar las dimensiones reflejadas en los anteriores epígrafes, pero no lo suficiente para dar así lugar a la formación de una supercelda.

CONCLUSIONES

A partir de la muestra de estudio y bajo las consideraciones tenidas en cuenta para el desarrollo de la investigación se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- No se pudo verificar la presencia de tormentas superceldas bajo las condiciones tropicales e insulares de Cuba, sin embargo, si se encontró la presencia de tormentas con dimensiones similares a las superceldas formadas en latitudes medias.

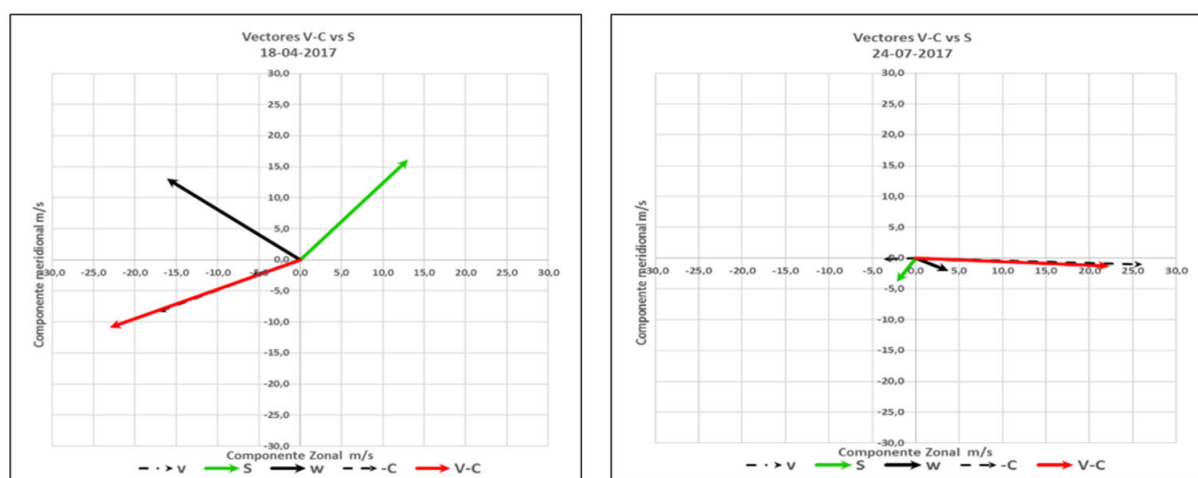


Figura 8. Representación del vector dirección del viento entre 0 - 1km (c), vector dirección del movimiento de la tormenta (V) y el vector de la cizalladura vertical del viento en la capa de 0 - 6 km (S), así como el vector de la vorticidad horizontal (w) para los días 18 de abril de 2017 (izquierda) y 24 de julio de 2017 (derecha).

- Las imágenes del satélite meteorológico mostraron la presencia de nubosidad convectiva de gran desarrollo vertical, al estar presente topos fríos y penetrantes. Mientras, a través de las observaciones del radar meteorológico, se evidenció la presencia de características de tormentas severas, principalmente en las tormentas del 18 de abril de 2017 y 24 de julio de 2018, aunque no fue posible verificar la presencia de un mesociclón.
- No se cumplieron las condiciones necesarias en el entorno que plantean las dos teorías existentes que explican la formación de tornados asociados a superceldas en la mayoría de los casos analizados, excepto en el caso correspondiente al día 24 de julio de 2017 donde reflejaba condiciones favorables para que la tormenta asimilara la vorticidad horizontal del ambiente a su corriente ascendente, aunque los valores de la misma eran muy pequeños.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas, D. (1963). Radar analyses of severe storm. Meteorological Monographs. 5 (27): 177 - 214.
- Chatterjee, P., and Prakash, P. (1989). A radar study of severe thunderstorms around Delhi, Northern India, during the Monsoon season. Atmospheric Research, 22 (1989) 373-384. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- Carnesoltas, M. (2002). La brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales. Revista Cubana de Meteorología, 9(1). 39-60 pp: ISSN. 0864-151X.
- Castro, A., Sánchez, J., Faile, R., y Madrid, J. (1989). *Análisis de la estructura de las tormentas del Valle Medio del Ebro*. Bol. San. Veg. Plagas, 15: 149-160, 1989. Laboratorio de Física de la Atmósfera. Universidad de León.
- Davis-Jones, R. (1984). Streamwise Vorticity: The Origin of Updraft Rotation in Supercell Storms. National Severe Storms Laboratory, pp 2991.
- Donaldson, R. J. (1965). Methods for identifying Severe Thunderstorm by radar: a guide and bibliography, bulletin AM5.
- Doswell, C., and Burgess, D. (1993). *Tornadoes and tornadic storms: A review of the conceptual models*. The tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards, Geophys. Monogr., No 79, Amer. Geophys Union, 161-172.
- Fujita, T. (1985). The downburst, microburst and macroburst. University of Chicago. SMRP Research Paper, (210).
- Gamboa, F.; W. Vázquez, O. Rodríguez, C. Pérez, R. Aroche, R. Rubirosa, I. Medina y J.C. Antuña (1993). Complejo Radárico Automático para la Información de Lluvia Localizada (CRAILL). [inédito]. Informe científico al INSMET.
- 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.
- Greene, D.R., and Clark, R.A. (1972). Vertically Integrated Liquid Water - A New Analysis Tool. Mon wea, Rev., 100, 548 - 552.
- Markowski, P. M. & Y. P. Richardson (2009). Tornadogenesis. Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. Atmos. Res., 93, 3-10 pp.
- Markowski, P., and Richardson, Y. (2010). *Meso-scale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell. ISBN: 978-047-074-2136. 430 pp.
- Quirantes, J. (2008). *Nociones básicas sobre Supercélulas*. INM, Agencia Estatal de Meteorología (AEMet).
- Quirantes, J., Martín, R., y Mora, N. (2014). *Características básicas de las supercélulas en España*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). NIPO: 281-14-008-X.
- Rotunno, R., & Klemp, J. B. (1982). The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. Mon. Weather Rev. 110, 136-151 pp.
- Rotunno, R., & Klemp, J. B. (1985). On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. J. Atmos. Sci. 42, 271-292 pp.
- Sauvageot, H. (1982). *Radarmeteorologie. Teledetección active de L' atmosphere*. Ed, Eyrolles. Paris, France.
- Stull, R. (2015). *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. ISBN-13: 978-0-88865-176-1.
- Varela, R. (2017). *Factores que intervienen en la formación de tornados en la región occidental de Cuba*. Tesis en opción al título académico de Master en Ciencias Meteorológicas. La Habana, Cuba.
- Weisman, M., & Rotunno, R. (2000). The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics. J. Atmos. Sci., 57, 1452-1472 pp.
- Wicker, L. & Cantrell, L. (1996). The Role of Vertical Buoyancy Distributions in Miniature Supercells. Preprints, 18th Conference on Severe Local Storms, San Francisco, CA, American Meteorological Society, 225-229.
- Zipser E. J., and Lutz, K. R. (1994). The vertical profile of indicator of storm intensity and lightning probability. Mon. Wea. Rev., 122, 1751-1759.