



Revista Cubana de Meteorología

ISSN: 0864-151X

ISSN: 2664-0880

Instituto de Meteorología

Carnesoltas-Calvo, Mario; Varela-de la Rosa, Alis; Sierra-Lorenzo, Maibys; Llanes-Monteagudo, Miriam T.; Rodríguez-González, Orlando; Caymares-Ortiz, Armando; Pila-Fariñas, Elier; Valdés-Alberto, Rafael; Gutiérrez-Rivera, Marlin; Ramos-Guadalupe, Luis E.

Tornado que afectó La Habana el 27 de enero de 2019

Revista Cubana de Meteorología, vol. 25, núm. 3, e08, 2019

Instituto de Meteorología

DOI: <https://doi.org/opn.to/a/xXnsy>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977491008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEH
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Tornado que afectó La Habana el 27 de enero de 2019

Tornado that affected Havana on January 27, 2019

Mario Carnesoltas-Calvo ^{1*}, Alis Varela-de la Rosa ², Maibys Sierra-Lorenzo ¹,
Miriam T. Llanes-Montegudo ², Orlando Rodríguez-González ³, Armando
Caymares-Ortiz ², Elier Pila-Fariñas ², Rafael Valdés-Alberto ³, Marlin
Gutiérrez-Rivera ⁴, Luis E. Ramos-Guadalupe ⁵



<http://opn.to/a/xXnsy>

¹Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

²Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

³Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Cuba

⁴Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

⁵Fundación Fernando Ortiz, Ministerio de Cultura, La Habana, Cuba

RESUMEN: El 27 de enero de 2019 un tornado de categoría EF4, según la escala de Fujita Pearson mejorada, afectó la ciudad de La Habana, provocando gran destrucción y la pérdida de vidas humanas. El presente artículo es una síntesis del Informe “Tornado intenso que afectó la ciudad de La Habana el 27 de enero de 2019. Análisis de las causas que lo generaron” (Carnesoltas, M. et al., 2019). El resultado de la investigación tuvo como único objetivo “analizar los principales factores físicos y meteorológicos que propiciaron el desarrollo del intenso tornado”. En el mismo se incluyeron los mapas de las condiciones sinópticas existentes ese día, las imágenes de satélite, de las observaciones de radar y de las mediciones terrestres de la estación automática y convencional de Casa Blanca, así como las fuentes de información empleadas; se describe la inestabilidad generada por una profunda vaguada en todos los niveles, que generó la formación de una activa línea de tormentas en forma de arco por delante de un frente frío (eco arqueado en la línea prefrontal). Se expusieron además los resultados obtenidos por el modelo numérico WRF que reflejó todo el proceso con los campos de la CAPE, vorticidad, reflectividad, entre otros. Entre los resultados significativos es que no aparecieron indicios de la existencia anticipada de ninguna supercelda clásica, ni una minisupercelda, sino que las características del tornado se asemejaron en varios aspectos a un vórtice de la γ - meso escala dentro del “Sistema Convectivo Cuasi - Lineal” (que constituyó la línea prefrontal).

Palabras clave: Tornado intenso, Sistema Convectivo Cuasi Lineal.

ABSTRACT: On January 27, 2019 an EF4 category tornado, classified according to the improved Fujita Pearson scale, affected Havana city, causing great destruction and the loss of human lives. This article is a synthesis of the report “Intense Tornado that affected the city of Havana on January 27, 2019, Analysis of the causes that generated it” (Carnesoltas, M. et al., 2019).. The sources of information used: maps of the synoptic conditions from that day, satellite images, radar observations and surface measurements from the automatic weather station (AWS) and the conventional Casa Blanca station. The instability generated by a deep trough at all levels is described, which generated the formation of an active arc-shaped storm line in front of a cold front (arched echo in the prefrontal line). There are presented the results obtained by the WRF numerical model that reflected the whole process with the CAPE fields, vorticity and reflectivity, among others. One of the significant results is that there was no indication of the anticipated existence of any classic super cell, nor a mini-super cell, but that the characteristics of the tornado resembled in several aspects a vortex of the γ -meso scale within the “Convective Quasi-Linear System” (which constituted the prefrontal line).

Keys words: Intense Tornado, Quasi Linear Convective System.

*Autor para correspondencia: Mario Carnesoltas-Calvo. E-mail: mario.carnesoltas@insmet.cu

Recibido: 12/06/2019

Aceptado: 13/09/2019

INTRODUCCIÓN

Entre los eventos severos que se encuentran en la naturaleza, los tornados constituyen uno de los más dañinos y de más difícil pronóstico, pues su formación es el “resultado de una compleja dinámica en la que intervienen múltiples procesos y estructuras a microescala que sólo se activan bajo ciertas condiciones ambientales” ([Acosta, 2008](#)). Muchas son las definiciones que se encuentran de los tornados, entre ellas el Vocabulario Meteorológico Internacional ([OMM, 1992](#)) plantea que estos fenómenos severos constituyen una “tempestad giratoria muy violenta de pequeño diámetro. Es el más violento de todos los fenómenos meteorológicos. Se producen a causa de una tormenta de gran violencia y toma la forma de una columna nubosa proyectada de la base de un cumulonimbus hacia el suelo”.

La formación y desarrollo de los tornados en Cuba es una realidad a tener en cuenta, pues aunque la ocurrencia e intensidad de los mismos es muy diferente a otras zonas del mundo, ninguna de las regiones del archipiélago cubano puede considerarse libre de estos destructores fenómenos. Aunque la mayoría de los tornados que ocurren en Cuba, según [Alfonso \(1994\)](#) y corroborado posteriormente por [Aguilar et al. \(2005\)](#), son clasificados como poco intensos (F0, F1 y F2), en el archipiélago se han reportado seis F3 y tres F4.

Esta no es la primera vez que un tornado afecta a la capital cubana, pero nunca de esta magnitud. El caso del 27 de enero de 2019 constituye un precedente para las investigaciones de los tornados en Cuba, pues es la primera vez que se cuenta con mayor número de información para un análisis más profundo de este evento, como son las observaciones desde satélite y radar. Cualquier investigación dirigida a incrementar los conocimientos sobre los tornados, y sobre todo los de gran magnitud, representa una novedad científica tanto a nivel nacional como internacional. Partiendo de ello, esta investigación se propuso como **objetivo principal** “analizar los principales factores físicos y meteorológicos que

propiciaron el desarrollo de un tornado en La Habana el 27 de enero de 2019”.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la investigación primeramente se analizaron los daños causados en la ciudad de La Habana, para tener los elementos necesarios para la clasificación de la intensidad del evento, así como la trayectoria que siguió sobre tierra, mediante un recorrido que se llevó a cabo por tierra y aire. El vórtice se generó alrededor de las 20:20 hora del meridiano 75° W del 27 de enero de 2019 (0120 UTC del día 28), en las inmediaciones del reparto Casino Deportivo, municipio del Cerro. El vórtice del tornado mantuvo un movimiento próximo al este-nordeste, con algunas fluctuaciones en su dirección hasta salir al mar por el reparto Celimar (al este del reparto Alamar), municipio Habana del Este, pero mucho más debilitado y en disipación. Recorrió unos 20 km de longitud ([figura 1. derecha](#)) y salió al mar aproximadamente a las 20:46 hora del meridiano 75° W, por lo que se movió a unos 46 km/h, y tuvo una duración total sobre tierra de unos 26 minutos. El ancho de la franja fue variable. En sus inicios tenía aproximadamente 50 m, luego su diámetro alcanzó hasta 200 m, ancho que mantuvo en la mayor parte de su trayectoria, para volver a reducir su área de influencia al final de su trayectoria.

En cuanto a su intensidad y teniendo en cuenta la evaluación de los daños observados, se confirmó que fue un tornado EF4 (vientos entre 267 y 322 kilómetros por hora), según la escala de Fujita mejorada ([figura 2](#)). Es por ello que se puede ratificar que tuvo vientos del orden de los 300 kilómetros por hora.

En el análisis del entorno existente en la escala α - meso el 27 y 28 de enero de 2019 (según escala de [Orlanski, 1975](#)), se utilizaron tanto los mapas elaborados por el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), como los reanálisis a partir de los datos del NCEP (National Center of Environment Prediction) y NCAR (National Center for Atmospheric Research). De estos Centros se extrajeron los mapas de los niveles 1000, 925, 850, 700, 600,



Figura 1. A la izquierda se observa la única foto tomada del tornado en La Habana el 28 enero 2019 a las 0135 UTC. A la derecha la línea roja representa la trayectoria verificada del tornado sobre La Habana.

Escala	Velocidad (km/h)	Daños potenciales
EF0	105–137	Daños leves. Algunas tejas caídas y otras pequeñas piezas de los tejados arrancadas, algunos daños en canaletas, ramas de árboles rotas y algunos árboles poco profundos arrancados. Los tornados que no causan daños visibles (por ejemplo aquellos que se producen en campos abiertos) se valoran siempre como de EF0.
EF1	138–178	Daños moderados. Tejados seriamente despedazados, caravanas y casetas volcadas o seriamente dañadas, pérdida de puertas exteriores y ventanas y otros cristales rotos.
EF2	179–218	Daños considerables. Tejados de casas sólidas arrancados, los cimientos de las casas se pueden mover, caravanas completamente destruidas, árboles grandes partidos o arrancados, pequeños objetos convertidos en proyectiles, coches arrancados del suelo.
EF3	219 – 266	Daños graves. Pisos enteros de casas bien construidas destruidos, daños graves a los edificios grandes (tales como centros comerciales), trenes volcados, árboles sin corteza, vehículos pesados levantados del suelo y arrojados a distancia, estructuras con cimientos débiles lanzados a cierta distancia.
EF4	267 – 322	Daños devastadores. Tanto las casas de hormigón y ladrillos como las de madera pueden quedar completamente destruidas, daños en estructuras de acero, los autos pueden ser proyectados como misiles.
EF5	> 322	Daños increíbles. Las casas fuertes pueden quedar arrasadas hasta los cimientos, las estructuras de hormigón armado dañadas críticamente, los edificios altos sufren graves deformaciones estructurales. Devastaciones increíbles.

Figura 2. Escala (mejorada) de Fujita para la intensidad de los daños de los Tornados.

500, 400, 300, 200 y 100 hPa, considerando una malla limitada horizontalmente entre los 10° y 50° de latitud norte y entre los 60° y 100° de longitud oeste, la que abarca todo el archipiélago cubano, así como sus territorios y mares adyacentes.

En el nivel de 700 hPa la onda polar se había profundizado significativamente y se puso en fase con la onda corta, formando un solo sistema que se

extendía desde al sur de Canadá, el noroeste de la Florida y el este de la península de Yucatán. Se pudo observar el cambio tan brusco que existía en los niveles de 850 y 700 hPa, al estar representada la baja extratropical nada más en los niveles inferiores de la tropósfera ([figuras 3 y 4](#)).

En la [figura 5](#) se muestran los cortes verticales de la componente zonal del viento en 82.0° W y

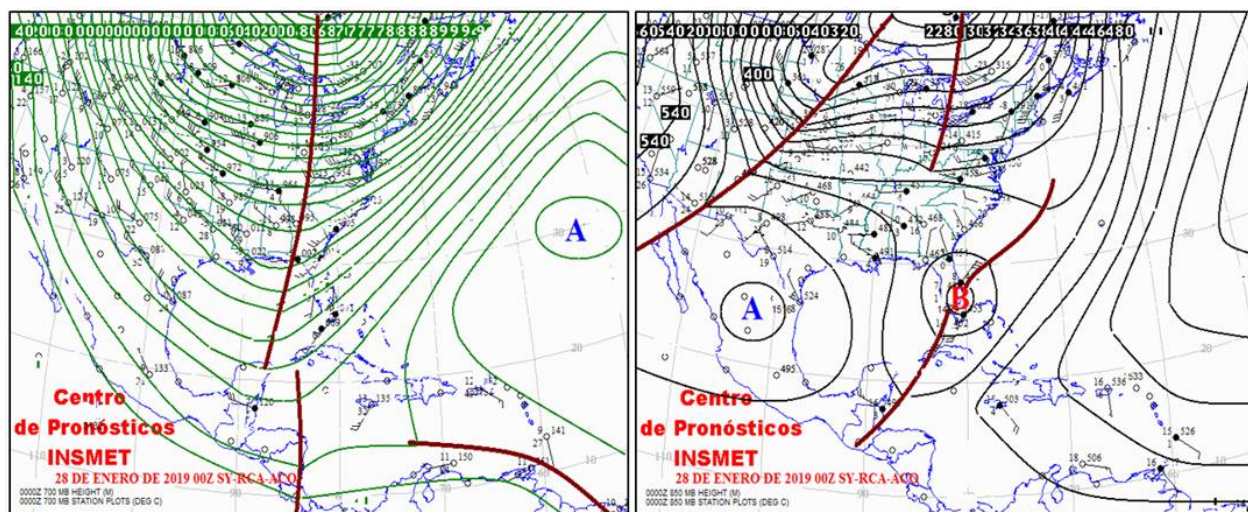


Figura 3. Mapas de los niveles de 700 y 850 hPa del 28 de enero 2019 a las 0000 UTC, elaborados en el Centro de Pronósticos del INSMET.

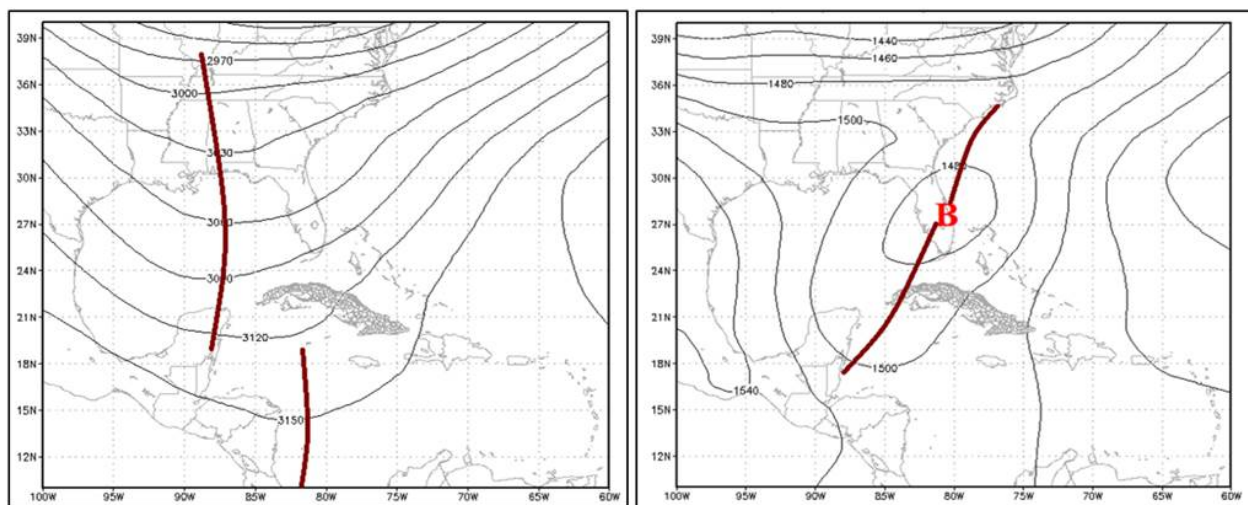


Figura 4. Mapas en los niveles de 700 y 850 hPa del 28 de enero 2019 a las 0000 UTC. (Fuente NCEP/NCAR).

80.0° W a las 0000 UTC. En ellos se observó solamente un núcleo de un chorro en la tropósfera superior (debajo de la tropopausa).

Luego el análisis se centró en las condiciones en la β - meso escala, específicamente en el segmento que correspondió a la línea prefrontal donde se generó el evento severo. Para ello, se utilizaron las imágenes desde el satélite meteorológico (figura 6).

Como el tornado ocurrió en horario nocturno, solamente estaban disponibles del satélite meteorológico GOES 16 los canales infrarrojos (7 al 16) todos con una resolución de 2 km. De los 10 canales nocturnos disponibles, el análisis se centró en los canales 7 (infrarrojo cercano), 8-10 (vapor

de agua en niveles altos, medios y bajos respectivamente) y el canal 13 (infrarrojo térmico “ventana”), por ser los más usados en la práctica operativa.

Con respecto a las observaciones por radar, se utilizaron los radares de Casa Blanca, en La Habana, y el ubicado en Pico San Juan, en Cienfuegos, así como el de Cayo Hueso, perteneciente a los Estados Unidos de América. Rodríguez (2019), refiriéndose a las observaciones de Casa Blanca (figura 7), planteó que “esta configuración nubosa no es una garantía de que se esté produciendo un tornado, aunque sí puede ser un indicativo de tiempo severo. Por delante del

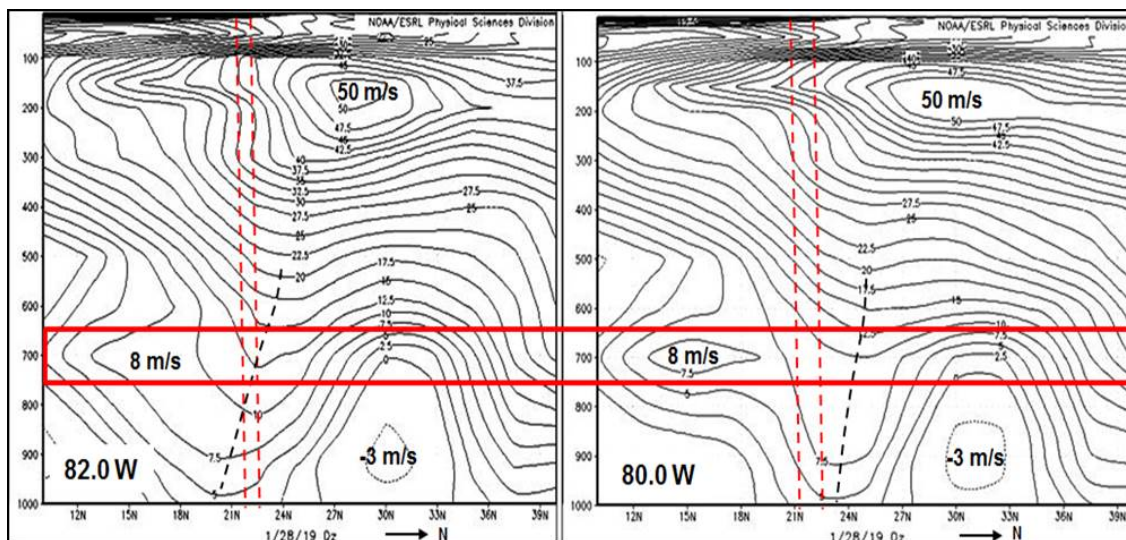


Figura 5. Cortes verticales de la componente zonal del viento en 82.0° W (izquierda) y 80.0° W (derecha) a las 0000 UTC del 28 de enero de 2019. Las líneas rojas verticales representan las costas norte y sur de Cuba.

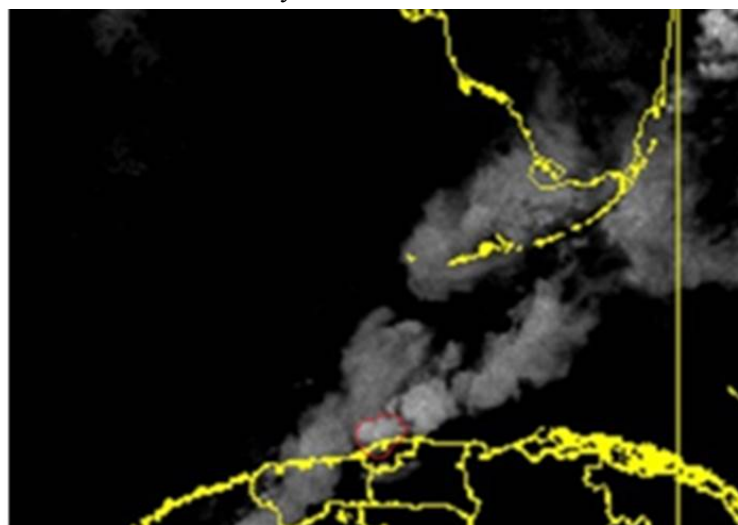


Figura 6. Imágenes del canal 7 del GOES 16 del día 28 de enero de 2019 a las 0137. Resaltada en rojo la celda convectiva.

frente había actividad convectiva severa, aunque ... las reflectividades no eran muy elevadas, solo la forma arqueada podía ser (o no) interpretada como un indicador de tiempo severo”.

El radar de Cayo Hueso está a unos 180 km del centro de La Habana. Las observaciones a esa distancia, con el ángulo más bajo que explora ese radar, tiene la gran limitante de que el centro del haz pasa a una altura de unos 3.51 km, de manera muy similar al radar de Pico San Juan. Por lo tanto, un vórtice tornádico de 200 metros de diámetro a baja altura no puede ser observado con certeza por

ninguno de ellos. Igualmente los topes de las celdas convectivas tendrían un error ± 2 km. A pesar de estas limitaciones, se procesó toda la información y algunos de sus resultados se incluyeron en el “Informe” (Carnesoltas, M. et al., 2019), tanto en imágenes, como en tablas. Con respecto al radar de Cayo Hueso, teniendo en cuenta su carácter Doppler, y la serie de productos que ofrece, sería el ideal para caracterizar y evaluar un evento de estas características. Sin embargo, debido a la lejanía en que se encontraba el tornado, presentó algunas limitaciones o errores que pueden ser interpretados

de esta información. Con respecto a este producto, la medida por el Radar Doppler KBYX de Cayo Hueso puede presentar el problema denominado en inglés “aliasing” (figura 8).

De acuerdo con [Brown & Wood \(2007\)](#), “esta modificación de los valores medidos por el radar, dada por las limitaciones técnicas del mismo, puede alterar los valores reales invirtiendo incluso el signo de la variable”.

Se utilizaron las salidas del Modelo de Pronóstico Numérico del Tiempo Rapid Refresh (RAP), en su versión de análisis disponible desde el 2012 y corre en el NCEP (National Centers for Environmental Prediction). También se utilizaron las salidas numéricas del Sistema de Pronóstico

Inmediato (SISPI). El SISPI tiene como objetivo fundamental, el pronóstico numérico de eventos meteorológicos de escala local. El principal modelo atmosférico utilizado en el mismo es el WRF (Weather Research and Forecasting), versión 3.8.1, el cual es inicializado con la salida del modelo GFS de 0.5 grados de resolución espacial. El SISPI tiene cuatro actualizaciones diarias de su pronóstico con una actualización trihoraria de las condiciones de frontera laterales. La configuración del WRF que forma parte del SISPI fueron determinadas a partir de varios estudios de sensibilidad y evaluación, los que se pueden consultar en DOI:10.13140/RG.2.2.29136.00005 y DOI:10.13140/RG.2.1.2888.1127. Esta salida cuenta con tres

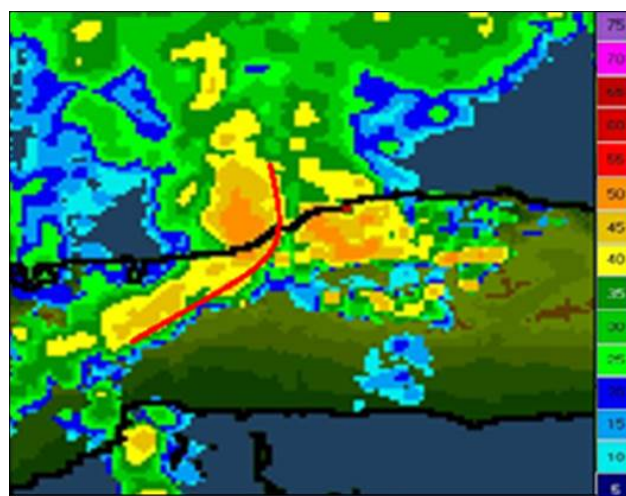


Figura 7. Imagen obtenida por un barrido a 0.5° de elevación por el radar de Casa Blanca a las 0115 UTC, señalando con una línea roja el eco arqueado.

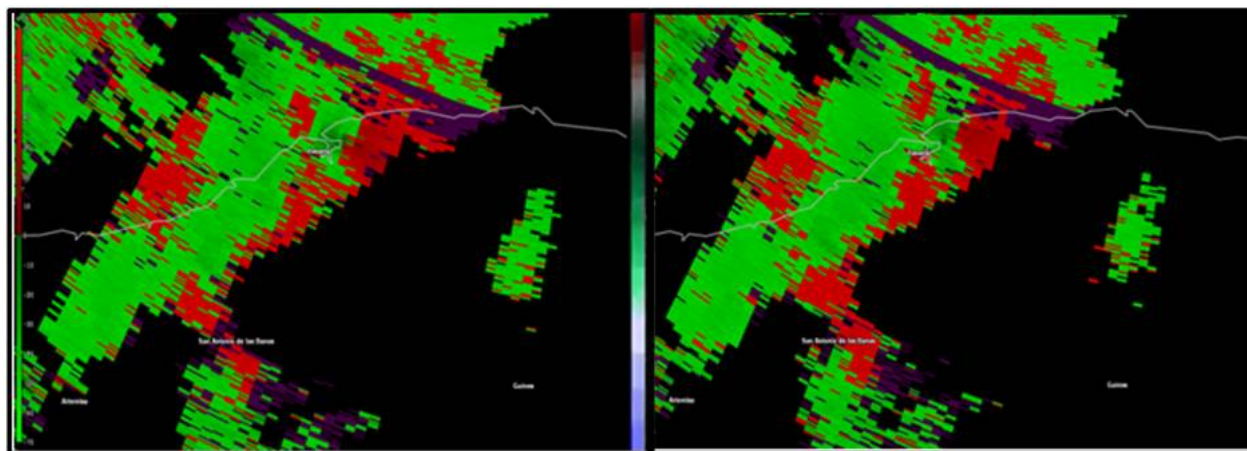


Figura 8. Imágenes de la velocidad radial obtenida por el radar de Cayo Hueso, Estados Unidos, a las 0137 y 0140 UTC del 28 de enero de 2019. Puede observarse el arco que limita los valores confiables de las mediciones.

dominios de simulación con resoluciones de 27, 9 y 3 km. El horizonte de pronóstico es de 72 h para los dominios de 27 y 9 km, y 24 h para el dominio de 3 km. Para el estudio de caso realizado se utilizó la corrida del SISPI de las 1200 UTC inicializada con la salida del GFS de las 0600 UTC. A partir de esta corrida y con intención de evaluar las condiciones con una mejor resolución debido a lo pequeño del evento analizado, se amplió las resoluciones a 1 y 0.333 km. La configuración física de estos dominios ([figura 9](#)) es la misma utilizada en el dominio de 3 km.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de toda la información obtenida por los radares meteorológicos disponibles (Casa Blanca y Pico San Juan y el de Cayo Hueso), y teniendo en cuenta sus limitaciones, se pudo determinar cómo la celda convectiva que acompañó al tornado, surgió delante de una línea prefrontal que avanzaba hacia el este por el norte del occidente del país, alcanzando su máximo desarrollo alrededor de las 0130 UTC, a la par con el máximo desarrollo del tornado. Si la celda se hubiera desarrollado antes del tornado, se podría pensar que ella fue la responsable del evento severo, pero al no ser así, se infiere que el tornado tuvo su origen a partir de la intensa vorticidad generada por un vórtice en la

Capa Fronteriza Atmosférica, el que contribuyó, al mismo tiempo, al desarrollo posterior de la tormenta.

Con los datos de la estación de Casa Blanca se pudo comprobar la influencia que provocó al entorno inmediato la cercanía del paso del vórtice del tornado con giro ciclónico, el eje de la línea prefrontal y posteriormente el frente frío ([figura 10](#)), corroborando lo que se observó en las imágenes de radar y satélite

Haciendo un resumen de estas tres variables, se puede plantear que los eventos sobre la estación de Casa Blanca ocurrieron en la siguiente secuencia: vientos fuertes de región sur; caída brusca a un primer mínimo en la presión con giro antihorario de la dirección y la primera racha máxima por la cercanía del vórtice del tornado; segundo mínimo de la presión con giro del viento al suroeste por el paso de la línea prefrontal; tercer y último mínimo de la presión con giro al norte de la dirección y aumento hasta el máximo de la velocidad por el paso del frente frío.

La Energía del Sistema

Una de las primeras cuestiones que aparece en la discusión de los sistemas convectivos es su clasificación de acuerdo a sus niveles de energía. Así surgió el llamado “espacio-R” ([Carbone et al., 1990](#)), y el diagrama de energía de la [figura 11](#). “Los valores altos del número bulk de Richardson

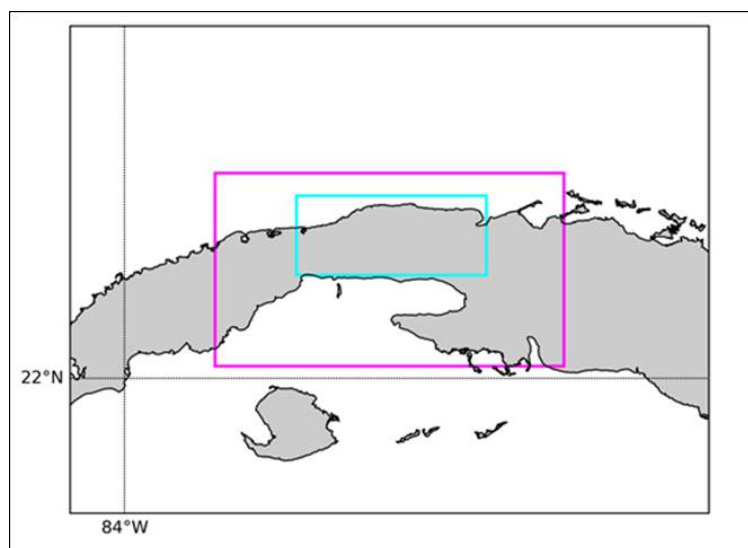


Figura 9. Dominios de simulación para el tornado. La línea violeta delimita el dominio de 1 km de resolución, y el interior (en verde claro) el de 0.333 km.

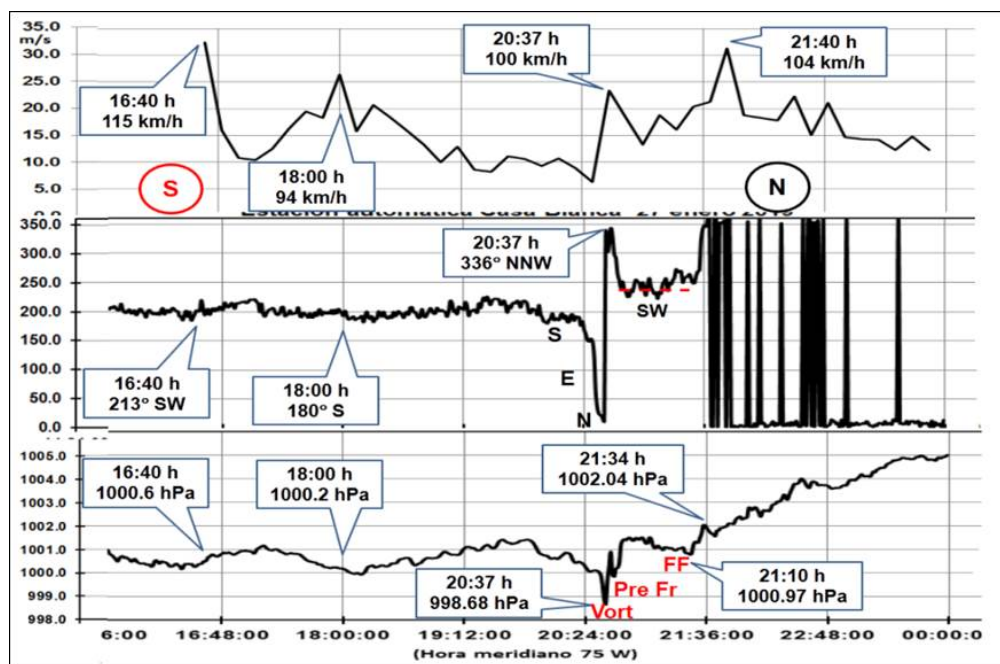


Figura 10. Registro de la velocidad y dirección del viento y de la presión atmosférica registrada en la estación automática de Casa Blanca el 27 de enero de 2019.

(BRN) corresponden a fuerte empuje hidrostático en relación con la cizalladura vertical del viento, los que están asociados a sistemas de multiceldas, los valores intermedios a las superceldas, mientras los valores bajos se asocian a las celdas ordinarias con diferentes magnitudes de cizalladura” (Weisman & Klemp, 1982). Pero si además se comparan con las líneas curvas de igual energía determinadas por la expresión $ES = [2 CAPE \cdot (\Delta U)^2]^{1/2}$, no solamente se puede observar que una muestra de tormentas seleccionadas sobre Cuba durante 2017 (Tormentas Locales Severas en triángulos rojos y Tormentas Ordinarias en círculos negros), se ubican dentro de un rectángulo con valores de la CAPE menores de 2100 J/kg, y menores de 30 m²s² en el eje de la diferencia de velocidades verticales, esto es, todas pertenecen al dominio de los sistemas convectivos de baja energía.

Si se ubica el tornado del 27 de enero de 2019 en el diagrama, se podrá observar que también cae dentro de los sistemas convectivos en entornos de baja energía. Por supuesto que esto **no significa** que el tornado no sea clasificado como un EF4, o que disminuya su intensidad, sino solamente

demuestra que pertenece a los tornados no superceldas en entornos de baja energía.

Precisamente por lo anterior, uno de los aspectos a señalar en el evento del tornado en La Habana, fue el comportamiento que presentó la CAPE este día sobre el occidente de Cuba. En la [figura 12](#) tomado del RAP análisis, pero ahora a las 0100 UTC y en un dominio mucho menor que el de la figura anterior, en este caso correspondiendo a la provincia de La Habana, se puede observar que el núcleo alargado de mínimo valor de la CAPE (570 J/kg), se ubicaba justo por delante de la línea prefrontal, aumentando cuando se alejaba de la misma.

También a la 0100 UTC con los datos del RAP en las coordenadas 23°.08 N y 82°.38 W (por donde minutos más tarde cruzó el tornado), se construyó el perfil de la CAPE en base a superficie (SBCAPE). En dicha coordenada a esa hora, la SBCAPE sólo era de 491 J/kg ([figura 13](#)).

Como se puede observar, el perfil mostrado minutos antes del paso del tornado sobre este punto de La Habana, así como los valores de la CAPE por sí mismos, no mostraba ningún parecido a los perfiles ni a los valores típicos de las superceldas o mini superceldas, o sea, una convección libre muy

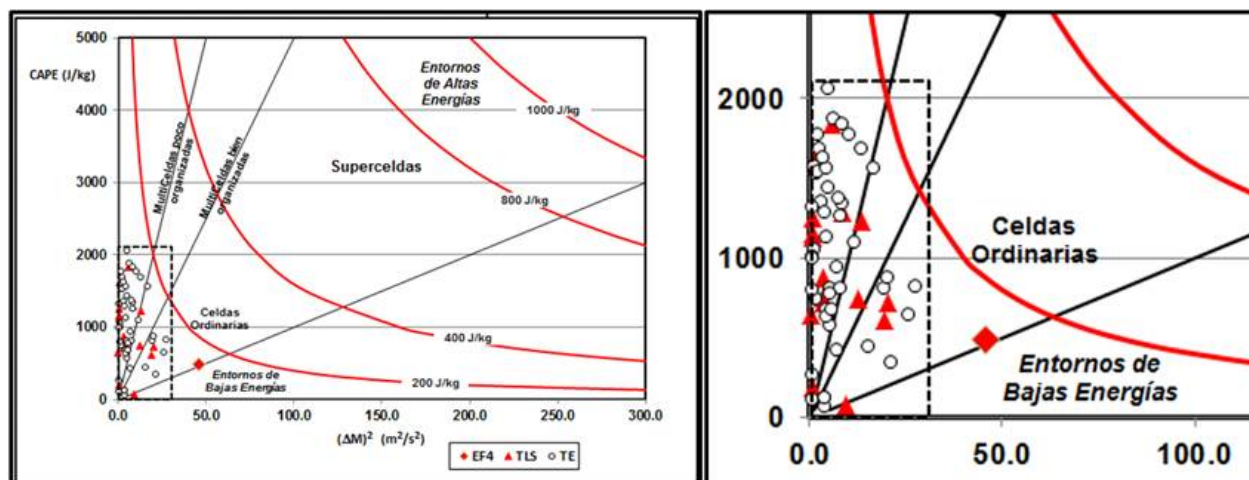


Figura 11. Diagrama de energía para los sistemas convectivos. En el panel derecho se muestra la ampliación del dominio de la muestra de celdas y el tornado de La Habana. Los valores del BRN se representan por las líneas inclinadas y los de la energía del sistema (ES) por las líneas curvas ([Carnesoltas & Gutierrez, 2019](#)).

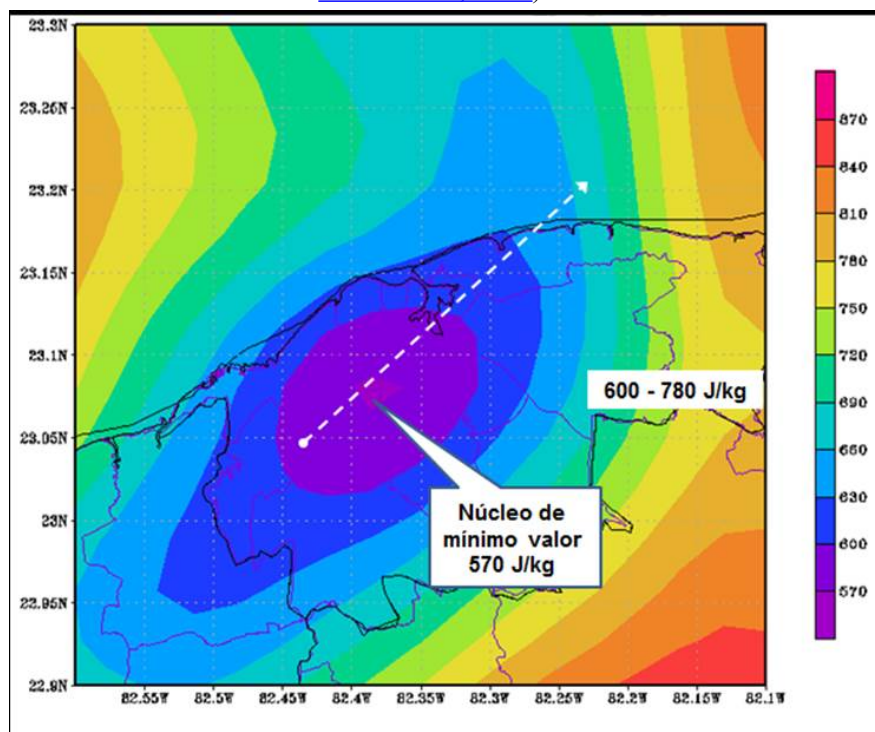


Figura 12. Campo de la CAPE sobre La Habana el 28 de enero de 2019 a las 0100 UTC (fuente RAP).

Las líneas discontinuas representan el recorrido aproximado que minutos más tarde siguió el tornado limitada. Esto fue lo que hizo pensar en un inicio que el evento severo tuvo que ser inducido por condiciones de convección forzada en la Capa Fronteriza Atmosférica.

En el análisis a partir de la salida del SISPI se pudo observar como los valores más bajos del campo de la CAPE en todo el dominio se

encontraban a lo largo de la línea prefrontal, y que este campo se movió junto con el vórtice más intenso. Así, a las 0135 UTC del día 28 de enero de 2019 ([figura 14](#)), la nubosidad se desarrolló a lo largo del borde delantero de la línea prefrontal desde final de la tarde y las primeras horas de la noche, con muy bajos valores de la CAPE.

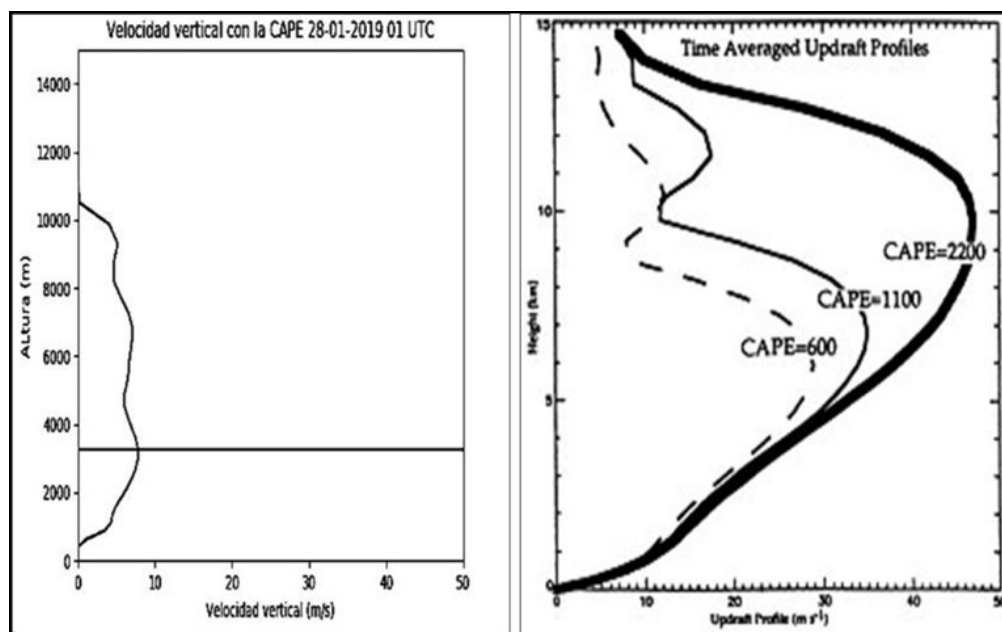


Figura 13. Perfil de la CAPE el 28 de enero de 2019 a las 0100 UTC (RAP).

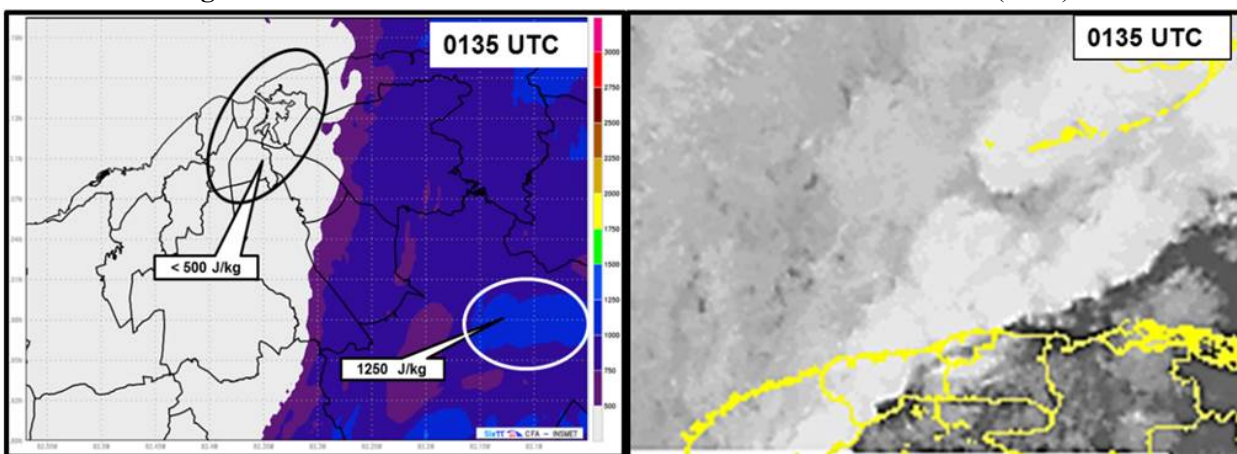


Figura 14. Campo de la CAPE a partir de la salida del SISPI e imagen del GOES 16 en la banda IR sobre La Habana del día 28 de enero de 2019 a las 0135 UTC.

De tal característica se puede inferir que la nubosidad no fue producto de la convección libre como en otros casos (por la CAPE), sino mayoritariamente por el aporte de energía hacia arriba que le proporcionó el intenso vórtice de la mesoescala que se encontraba en la capa inferior de la tropósfera desde la misma superficie terrestre.

Las dos teorías clásicas para el desarrollo de tornados superceldas

Se conoce que existen dos grandes grupos para explicar la formación de los tornados: los del tipo I originados por superceldas, y los del tipo II no originados por tormentas superceldas. Como se ha

expresado, las condiciones termodinámicas ideales para la formación de superceldas no estaban presentes en La Habana. Sin embargo, para tener total certeza de ello se procedió al análisis de las dos teorías que en los últimos años pretenden predecir la formación de superceldas y de tornados. Para ello, uno de los elementos fundamentales que hay que tener en cuenta en el origen de los tornados lo constituye la generación de vorticidad vertical. [Markowski & Richardson \(2009\)](#) señalaron que para el tipo I “la vorticidad vertical se origina inicialmente en las corrientes ascendentes de las tormentas, como resultado de la inclinación y

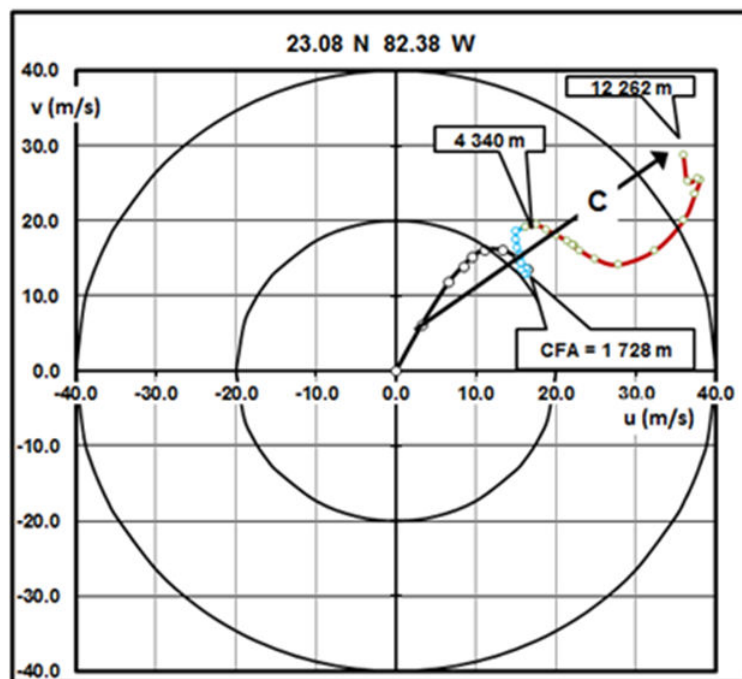


Figura 15. Hodógrafa obtenida por el RAP a las 0100 UTC del 28 de enero 2019 en las coordenadas 23.08° N y 82.38° W.

posterior estiramiento de la vorticidad horizontal asociada con la cizalladura vertical media del viento”.

Según [Weisman & Rotunno \(2000\)](#), existen dos teorías referentes a la cizalladura y su influencia en la formación de rotación dentro de las superceldas. La primera teoría es la referente con la interacción de la corriente ascendente con un entorno de cizalladura vertical del viento ([Rotunno & Klemp, 1982, 1985](#)), mientras la segunda, planteada por [Davies - Jones \(1984\)](#), hace referencia a un entorno de helicidad relativa a la tormenta (SREH).

Partiendo de la primera teoría, se procedió al análisis de la hodógrafa obtenida por el RAP a las 0100 UTC del 28 de enero de 2019 en las coordenadas 23.08° N y 82.38° W. La [figura 15](#) muestra que la hodógrafa no tenía semejanza con las clásicas ni para los celdas simples, ni para las multiceldas, ni mucho menos para las superceldas que se desarrollan en latitudes medias; que la CFA presentó un giro que corresponde a una capa estable; en ella aparece la capa de transición entre la CFA y la atmósfera libre (entre 1728 y 4240 m); y que en todo el espesor del flujo superior, existió una capa inestable. El análisis de la hodógrafa indicó que el tornado solamente pudo desarrollarse

en los niveles más bajos, y que la tormenta no tomó su vorticidad de la cizalladura de su entorno más cercano.

La segunda teoría está basada en el uso de la “vorticidad paralela” y de la “vorticidad perpendicular” para determinar las características rotacionales de una corriente ascendente cuasi-estacionaria de una tormenta. En el análisis del cumplimiento o no de la segunda teoría se tomaron en cuenta los tres vectores necesarios: el vector “C” de la dirección en la que se desplazó la celda convectiva, el vector “V” de la corriente en superficie que debe haber alimentado la tormenta, y el vector “S” de la cizalladura en el nivel donde deben encontrarse los vórtices horizontales a cierta altura de la superficie. En la [figura 16](#) se muestran los vectores sobre la hodógrafa de la [figura 15](#), pero aumentadas sus magnitudes para su mejor visualización.

En el primer caso ([figura 16 izquierda](#)) el vector diferencia “V - C” tendría el mismo signo que el vector “ ω ”, indicando la mayor probabilidad que el vector V así seleccionado, fuera el que alimentó la tormenta. Sin embargo, la orientación del vector “V - C” presentaba un ángulo muy separado del vector “ ω ”, lo que no garantizaba que la corriente

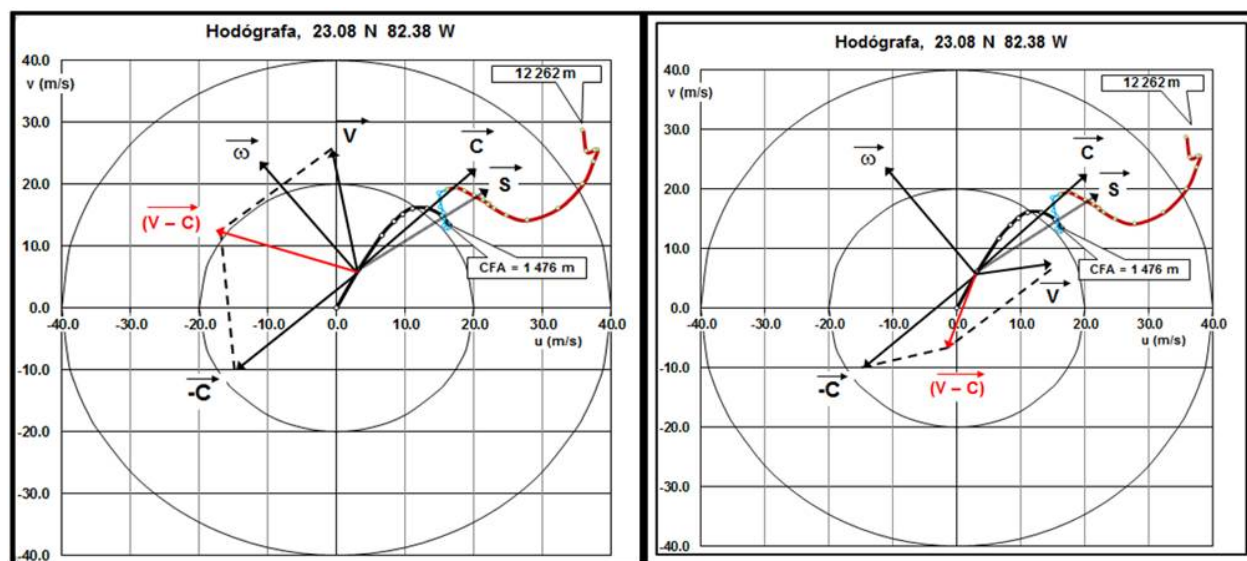


Figura 16. Representación de los vectores C, V, S y V-C a partir del primer nivel de altura sobre la superficie (no en la superficie), para poderlo considerar como representativo del flujo medio en la capa. En el panel izquierdo se muestra el caso en que se consideró que la tormenta había sido alimentada por el flujo del sursureste que estaba delante de la prefrontal; en el panel derecho es el caso donde se consideró que la tormenta había sido alimentada por el flujo del suroeste que estaba detrás de la prefrontal.

ascendente de la celda convectiva fuera capaz de incorporar rotación adicional a sus corrientes ascendentes mediante la inclinación de los vórtices horizontales generados por la cizalladura del ambiente y dar así lugar a la formación de una supercelda. En el segundo caso ([figura 16 derecha](#)) el vector diferencia “V - C” estaría dirigido en sentido contrario al vector “ ω ” (signos opuestos), indicando que no existía probabilidad que el vector V así seleccionado, fuera el que alimentó la tormenta, y por lo tanto que no se cumplía la teoría de la vorticidad paralela.

Este resultado ratifica que las condiciones dentro de una supuesta tormenta no pudieron ser las que dieron lugar al tornado, ya que, a pesar que el ambiente presentaba suficiente vorticidad, ésta se concentraba en las capas bajas, principalmente en los niveles por debajo de la base de la celda convectiva, por lo que no era capaz de incorporar esta vortidad a su corriente ascendente y dar lugar a la formación de un mesociclón, característica clásica de una supercelda o minisupercelda.

Indices que se emplearon para la intensidad del tornado

En el análisis de los sistemas convectivos aparecen los llamados índices, las variables

compuestas de diagnóstico y las de pronóstico. En la [tabla 1](#) se muestran (en negrita), los valores umbrales para cada proceso meteorológico, según las investigaciones realizadas sobre el territorio de los Estados Unidos ([Stull, 2015](#)), mientras que las cifras en rojo al lado de los valores umbrales, son los encontrados en el caso del tornado del 27 de enero de 2019 en La Habana.

En resumen, en la [tabla 1](#) se puede apreciar la inconsistencia con la realidad en la mayoría de los valores de los índices y variables compuestas calculados, las causas pueden deberse, por un lado, a que dichos valores umbrales no son para las regiones tropicales donde se encuentra Cuba; en segundo lugar, la tabla no contempla las condiciones para los tornados no superceldas; y en tercer lugar, por las condiciones meteorológicas excepcionales que se presentaron en la noche del 27 de enero de 2019.

Resultados del Modelo Numérico para el entorno del tornado

A los resultados mostrados en la [tabla 1](#) deben añadirse el análisis de los campos de algunos de estos mismos índices y variables diagnóstico, y de otros no incluidos en la tabla, obtenidos por el SISPI. Estos campos a pesar que este modelo

(como todo modelo), también tiene sus propias limitaciones conocidas, resultó ser la fuente que con mayor claridad reflejó el proceso del tornado intenso en La Habana. Entre los campos obtenidos por el modelo que mejor reflejaron el evento se pueden mencionar los de la CAPE, la vorticidad desde superficie hasta 700 hPa, la velocidad vertical, la reflectividad, y el índice de la energía de la helicidad. A continuación se mostrará una muestra de estos resultados (excepto la CAPE que ya se analizó de manera independiente).

El campo de la vorticidad en superficie ([figura 17, izquierda](#)), muestra la inmensa cantidad de vórtices tanto con sentido ciclónicos como anticiclónicos que existían delante, sobre y detrás de la línea prefrontal, en especial los generados por la turbulencia en los niveles inferiores, aspecto que se conoce cuando están presentes estos tipos de sistemas. Pero sobre todos ellos se destacan los que se ubicaron sobre el borde delantero de la línea prefrontal, coincidiendo con las posiciones sucesivas en las que se encontró el tornado durante

Tabla 1. Valores de los índices y variables compuestas que se emplean corrientemente. (Los valores umbrales se tomaron de [Stull, 2015](#)).

Tormentas (Cb) & Tornado (EF0-EF5)							
Indice, Variable	No Cb	Cb Ordinario	Supercelda (Marginal)	Supercelda, no tornado	Supercelda & EF0-EF1	Supercelda & EF2-EF5	unidades
CAPE (SB)	491	950	1205	1460	1835	2150	J/kg ⁻¹
CAPE (MU)		1750	1850	1950	2150	2850	J/kg ⁻¹
CIN		18		35	12	5.7	J/kg ⁻¹
Altura Tope			12		15	20	km
Diámetro			10		50	200	km
Duración			1		2 - 3	2 - 3	hora
NCA		1.75	1.47	1.34	1.18	1.00	0.6 km
NCL						0.7	km
SCP		0.12	1.1	3.5	5.9	24	
BRN		150	70	30	30	30	10.7
BRN shear		7	30	45	55	70	m ² s ⁻²
TSM		13.8	< 15		> 25		m ² s ⁻²
SRH (0-1km)		20	48.7	70	115	155	239
SRH-efectiva		16	60	117	166	170 - 200	m ² s ⁻²
EHI (ML0-1km)		0.1	0.5	0.7	0.8	1.4	2.1
Shear (0-6km)		8	15	15	22	23	231
STP		0	0	0.4	0.9	1.0	2.7

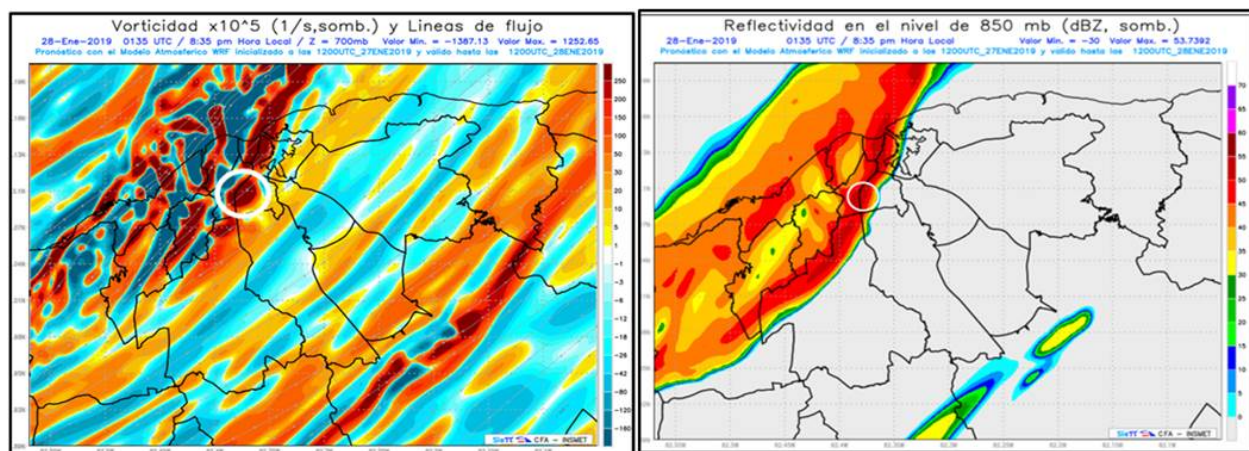


Figura 17. Campos de la vorticidad en el nivel de 1000 hPa y de la reflectividad, el 28 de enero de 2019 a las 0135 UTC (SISPI).

su trayectoria sobre tierra (la posición en esa hora se señala con el círculo). En el campo de la reflectividad ([figura 17 derecha](#)), se aprecia con claridad el avance de la nubosidad que acompañaba la línea prefrontal, con los valores más intensos (entre 45 y 50 dBz) a lo largo del borde delantero. Al oeste de la línea, la reflectividad era nula. Aquí se puede inferir que la nubosidad más intensa estuvo ubicada en el borde delantero, sobre la línea de los numerosos vórtices ciclónicos y las corrientes verticales más intensas.

Cortes verticales por el Modelo Numérico

Además de los campos horizontales de las variables anteriormente mostrados obtenidos por el

SISPI, se hicieron cortes verticales en intervalos de un minuto (desde las 0100 UTC hasta las 0200 UTC), a lo largo de la línea prefrontal en un plano móvil, siguiendo las posiciones sobre tierra del tornado, comenzando a los 23.040° N hasta los 23.175° N. En la [figura 18](#) se muestran en un plano vertical, los campos de la vorticidad y de la velocidad vertical; mientras en la [figura 19](#) se muestra el campo de reflectividad a las 0135 UTC.

En las [figuras 18](#) y [19](#) se puede ver que todo el proceso del tornado ocurrió solamente por debajo del nivel de 600 hPa (4350 m), independientemente que las nubes Cb generadas sobre el vórtice principal alcanzaron topos mayores. Una de las comparaciones que refleja con mayor claridad lo

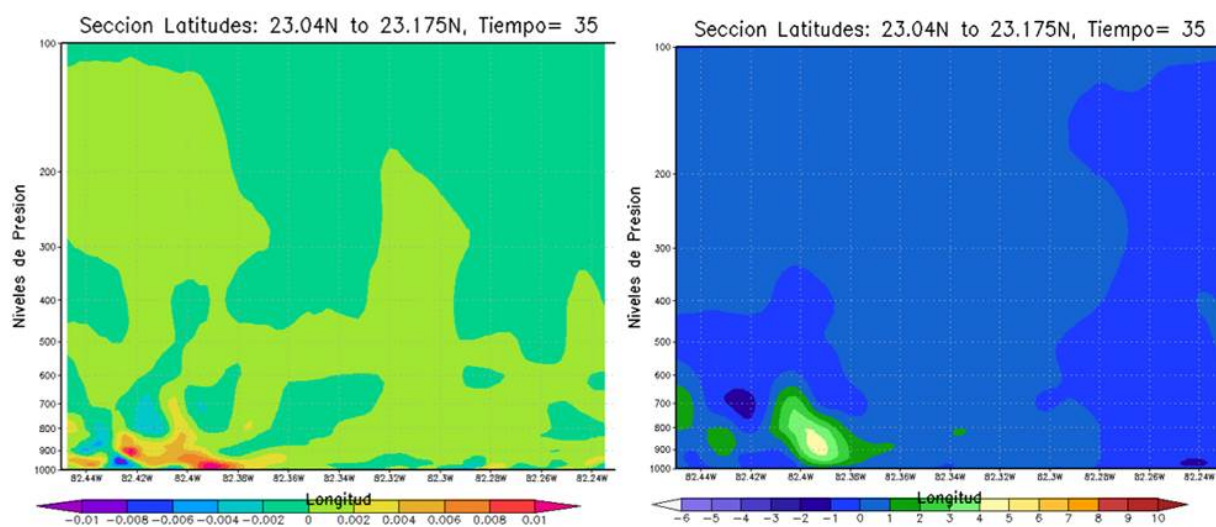


Figura 18. Cortes verticales de la vorticidad y la velocidad vertical desde 1000 hasta 100 hPa, a las 0135 del 28 de enero de 2019 (SISPI).

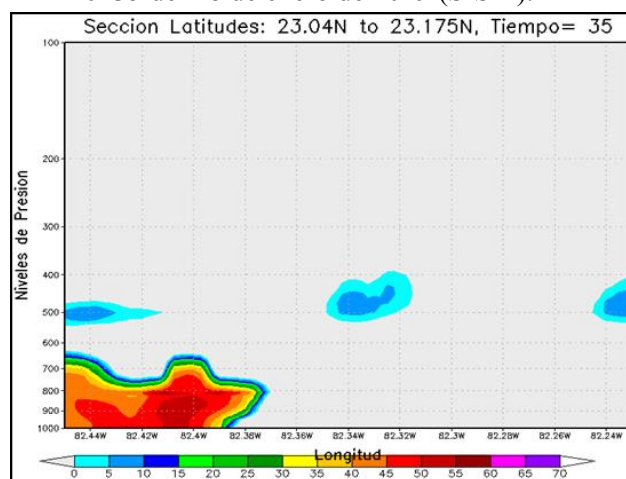


Figura 19. Corte vertical de la Reflectividad (dBz) desde el nivel de 1000 hasta 100 hPa, a las 0135 UTC del 28 de enero de 2019 (SISPI).

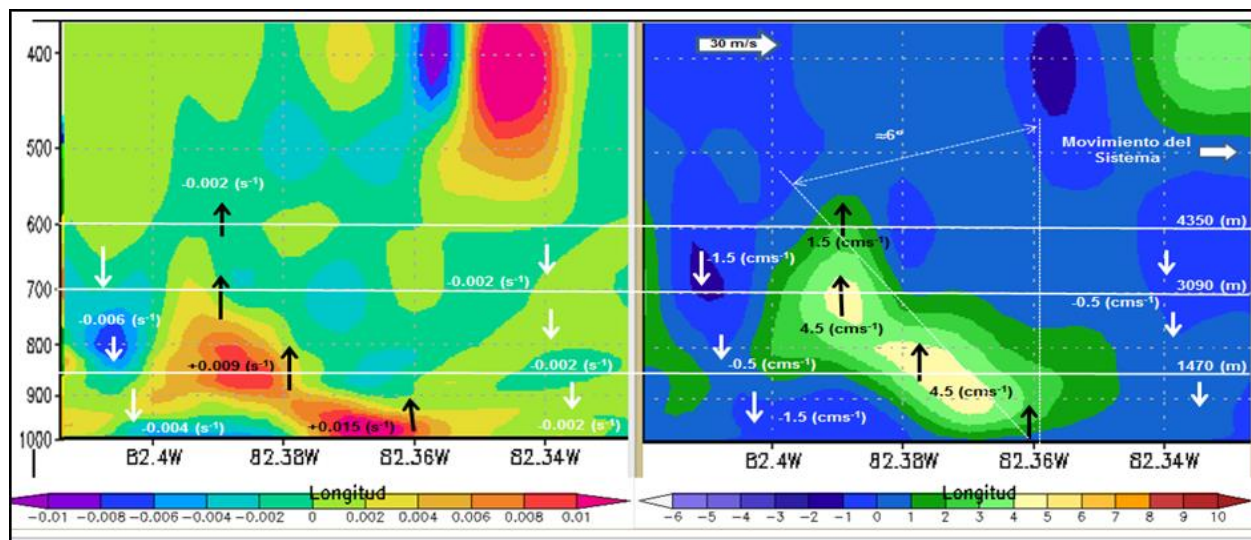


Figura 20. Comparación ampliada entre los campos de vorticidad y de la velocidad vertical a las 0130 UTC.

ocurrido, se muestra en la [figura 20](#) entre los campos de la vorticidad y la velocidad vertical.

En la [figura \(20\)](#) se muestra una ampliación de los dos campos, pero ahora sólo aparecen los niveles bajos y medios de la tropósfera y algunos valores de los núcleos principales. En las secuencias realizadas se pudieron apreciar algunos aspectos que caracterizaron el entorno inmediato al tornado, entre ellos:

1. Durante todo el tiempo el núcleo de vorticidad positiva más intenso (circulación ciclónica), mantuvo su base en la misma superficie terrestre y estuvo estrechamente vinculado a las corrientes verticales ascendentes;
2. Delante y detrás del núcleo de vorticidad positiva más intenso, existieron corrientes verticales descendentes de menores magnitudes, vinculadas a su vez, a centros de vorticidad negativa (circulación anticiclónica), pero de menor intensidad que los de vorticidad positiva.
3. El núcleo de vorticidad positiva más intenso tenía su eje vertical ligeramente inclinado hacia atrás con respecto al movimiento del sistema (aproximadamente unos 6° (en la figura la escala horizontal se amplió intensionalmente));
4. Los núcleos que aparecieron por encima de los 600 hPa se desplazaron a mayor rapidez que los sistemas relacionados directamente al tornado, al

parecer transportados por las fuertes corrientes del oestesuroeste presentes durante el proceso.

Las mini superceldas

Los cortes verticales de la suma de las razones de mezcla del contenido de agua, entre las 0130 y 0145 UTC del 28 de enero de 2019, obtenida por el SISPI ([figura 22](#)), igualmente muestran que la mayor concentración de humedad (mayores a 0.01 g/kg), relacionada con el tornado, se encontraba en la capa inferior de la tropósfera. Si hubiera existido en algún momento una supercelda o una mini supercelda, la concentración de esta variable no se hubiera encontrado solamente en la capa inferior, sino también en los niveles medios.

Las comparaciones de las simulaciones que aparecen en la [figura 21](#) y los cortes de la suma de todas las razones de mezcla ([figura 22](#)), tienen por objetivo resaltar las diferencias entre los tres sistemas convectivos, en especial lo que se refiere a la no existencia de un mesociclón tanto en las superceldas como en las minisuperceldas; mientras que en el caso del tornado de La Habana, sólo aparece una zona de alta reflectividad (45 - 50 dBz) con una corriente vertical ascendente, y el mayor contenido total de agua en la capa más baja de la tropósfera, todo esto en las coordenadas y las horas en las que se encontraba el tornado de La Habana el 27 de enero. Dadas estas características de la mini superceldas y lo ocurrido en La Habana, no

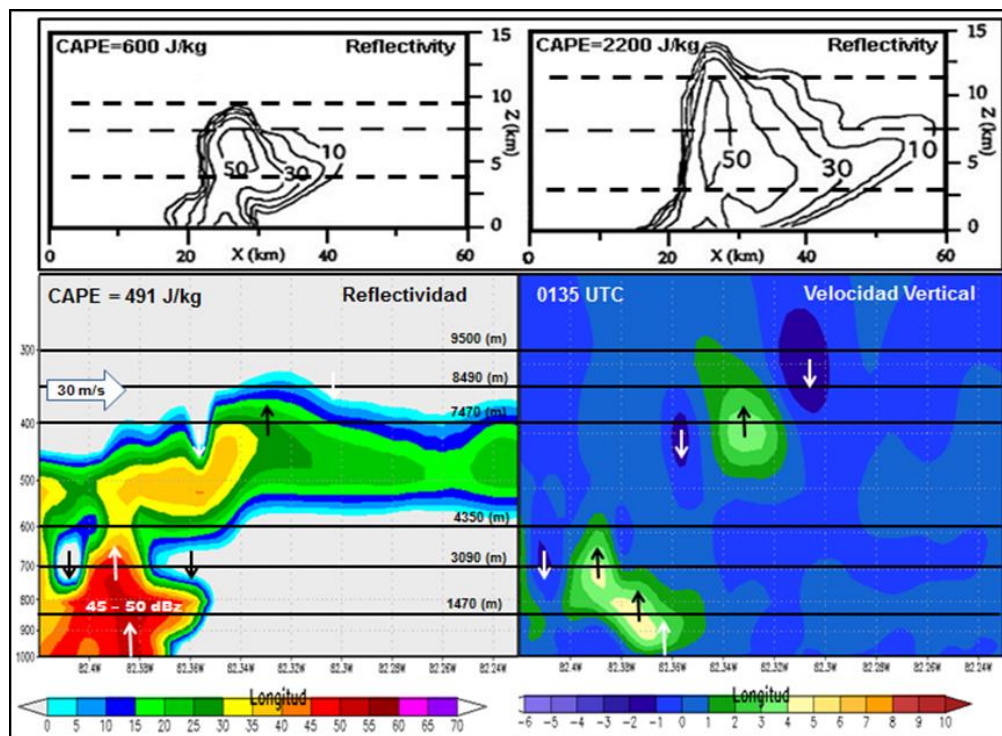


Figura 21. Simulación de un corte vertical de la reflectividad a través de la corriente ascendente de una minisupercelda (superior izquierda), y de una supercelda clásica (superior derecha), según [Wicker & Cantrell \(1996\)](#). En la parte inferior izquierda de la misma figura, se muestra la reflectividad y en la inferior derecha, las velocidades verticales, ambas obtenidas por el SISPI en el corte vertical donde se encontraba el tornado de La Habana el 27 de enero a las 0135 UTC.

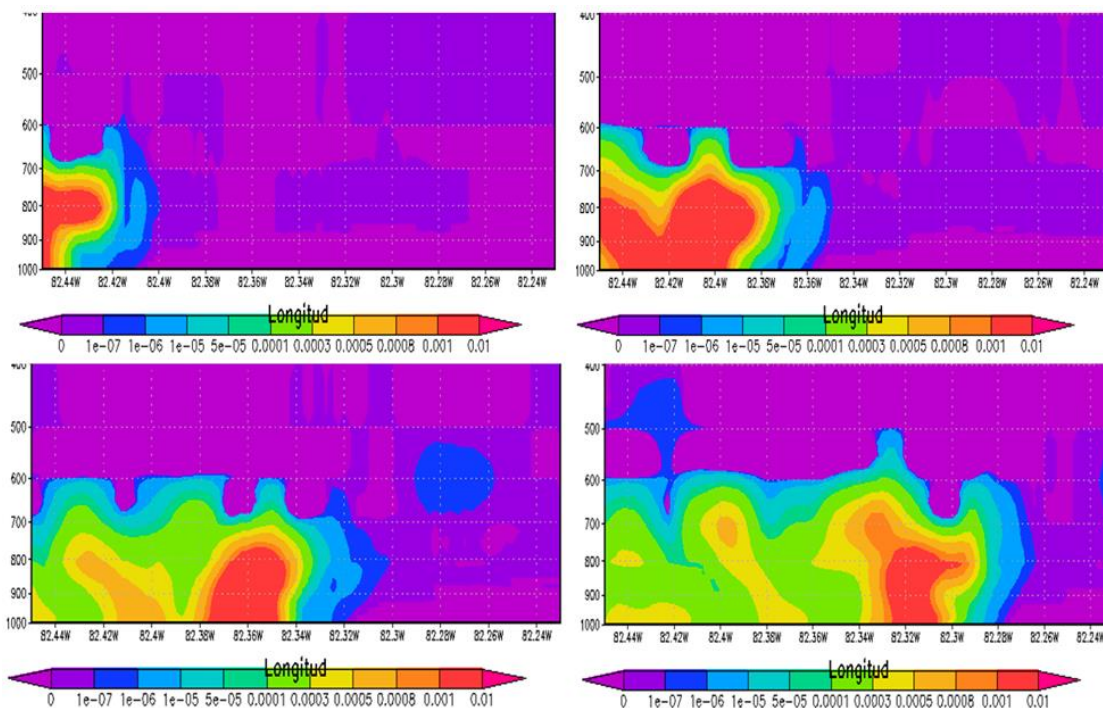


Figura 22. Cortes verticales de la suma de las razones de mezcla del contenido de agua, entre las 0130 y 0145 UTC del 28 de enero de 2019 (SISPI). El orden es de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

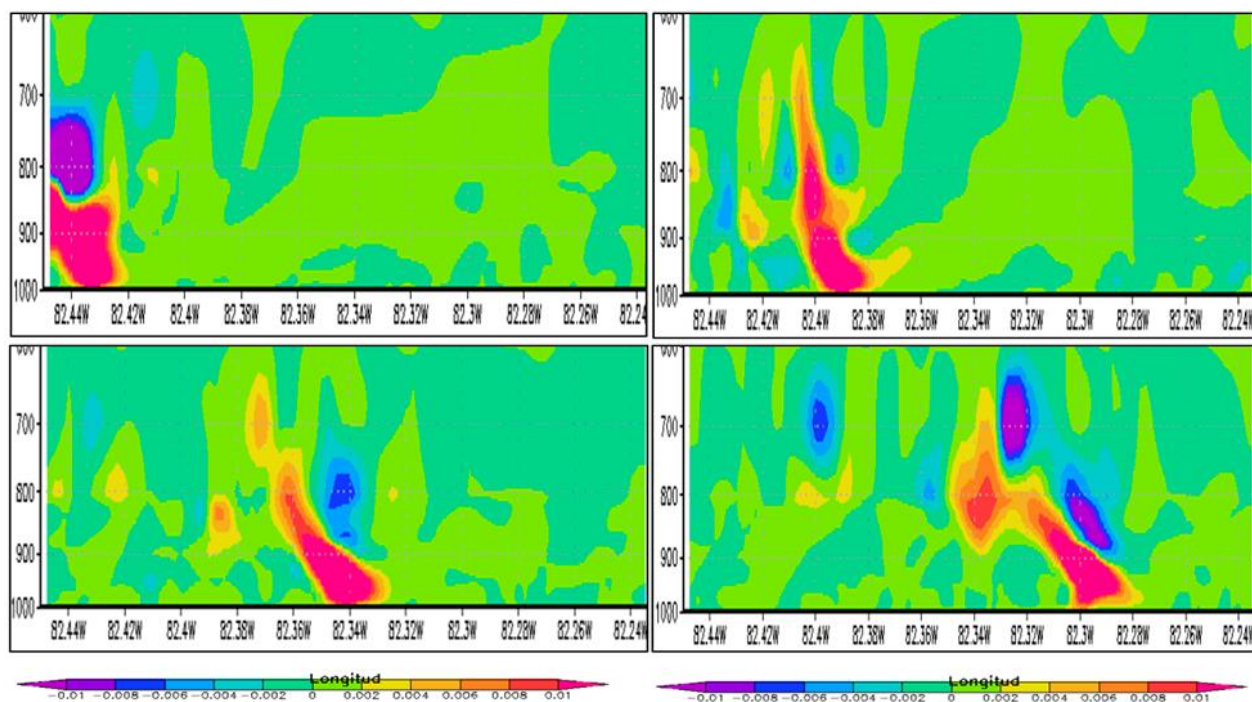


Figura 23. Secuencia del corte vertical de la componente vertical de la helicidad (obtenida por el SISPI), entre las 0130 y las 0145 UTC en las coordenadas donde se encontraba en cada momento el tornado del 28 de enero. El orden es de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

parece que el vórtice se haya generado a partir de una de estas mini tormentas.

Los Vórtices de mesoescala

Otro campo que se calculó en los cortes verticales fue la componente vertical de la advección de vorticidad, o sea, combinar en un solo campo para cada coordenada en las que se encontraba el tornado, el producto de las componentes verticales de la velocidad y de la vorticidad. Comunmente para ello se emplea el EHI, pero este índice está dirigido para la evaluación de la energía de los tornados formados a partir de superceldas y/o mini superceldas, en especial para sus mesociclones que existen entre el NCL y el NE, pero no refleja la energía de los mesovórtices ya que su parte principal se desarrolla siempre por debajo del NCL. Además, el EHI posee en el denominador una constante empírica ($1.6 \cdot 10^5 \text{ m}^4 \text{ s}^{-4}$), que para diferentes lugares y condiciones puede variar su valor. Entonces se consideró más conveniente emplear la componente vertical de la helicidad, o sea, el producto de las componentes verticales de la velocidad y de la vorticidad, que es una variable física cuyas

dimensiones son LT^{-2} . Permite también ser calculada a cualquier nivel de la tropósfera y no depende de ninguna constante empírica.

En la [figura 23](#) se muestra una secuencia de los cortes verticales de la componente vertical de la helicidad (obtenida por el SISPI), entre las 0130 y las 0145 UTC, en la capa comprendida desde la superficie y los 600 hPa (en los primeros 4000 m de altura). Esta capa, al igual que para las demás características mostradas con anterioridad, fue en la única donde se observaron cambios significativos en el campo de la variable helicidad. En todo el periodo se mantuvo un núcleo de valores positivos de la aceleración (ascenso con rotación ciclónica), desde la misma superficie de la tierra en las coordenadas del tornado, y núcleos negativos de la aceleración (descenso con rotación anticiclónica), en algunos momentos sobre, y en otros, a los lados del intenso núcleo ascendente. Se debe resaltar que los núcleos de valores negativos en ningún caso estuvieron en contacto con la superficie terrestre.

Este último resultado del modelo muestra una característica compatible y nada sorprendente que existen en todas las líneas prefrontales, predominio

de la inestabilidad y fuerte turbulencia, que además en este caso, actuó como un “Sistema Convectivo Cuasi Lineal”. También, que a pesar del caos que presentan siempre estos flujos, el modelo fue capaz de discriminar qué vorticidad predominó, su inclinación con la altura, y en cuál capa se desarrolló y se trasladó. Según el modelo SISPI el vórtice principal presentó rotación ciclónica y estuvo siempre sobre la superficie terrestre. Por lo tanto, este campo tampoco mostró indicios de existencia en ningún momento de mesociclones de superceldas o de mini superceldas.

Con la información disponible de la estación meteorológica automática ubicada en Casa Blanca y del conocimiento de las posiciones sucesivas del vórtice, a partir de las fórmulas propuestas por [Stull \(2015\)](#) fue posible estimar la “caída máxima de la presión en el centro del tornado”.

$$M_{\max} = M_0 + a (EF)^{1.2} \quad (1)$$

La velocidad tangencial máxima en la pared del vórtice fue de unos 75.28 m/s (equivalente a 271 km/h), donde los valores de las constantes son $M_0 = 29.1$ m/s y $a = 8.75$ m/s. Ya que la distancia R desde la estación hasta la pared del vórtice era mayor que el radio interior del tornado (R_0), se emplean las relaciones:

$$\text{Si } R > R_0 \quad \frac{M_{tg}}{M_{tg \max}} = \frac{R_0}{R} \quad \text{y} \quad \frac{\Delta p}{\Delta p_{\max}} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (2)$$

Entonces, por simple sustitución y despeje, la estimación de la caída de la presión en el centro del vórtice será:

$$\Delta p_{\max} = \frac{(M_{\max} + M_{trast})^2}{(M_{tg})^2} [2(\Delta p)] \quad (3)$$

La distancia mínima estimada desde la estación automática de Casa Blanca hasta el punto más cercano en que se encontraba el vórtice, resultó ser aproximadamente de $R = 2.8$ km y el radio medio del vórtice estimado en el terreno era $R_0 = 0.2$ km, entonces, como $R > R_0$, se deberá emplear la [relación \(2\)](#) y la [fórmula \(3\)](#). El resultado fue que la caída de la presión en el centro del vórtice con respecto a su entorno inmediato debió de ser aproximadamente de unos 20.6 hPa, valor que, aunque estimado, es una caída de presión acorde a un tornado intenso EF4.

Como se mostró en la [figura 10](#), el registro del viento y la presión en la estación de Casa Blanca, así como en todas las figuras obtenidas por el SISPI, indican la rotación ciclónica del tornado del 28 de enero de 2019 en La Habana. Una de las posibles causas (y la más probable), de la intensificación de un sólo vórtice de los diversos que existían en el borde delantero del eco arqueado, así como su sentido de rotación, es lo explicado en las investigaciones de [Atkins & St. Laurent \(2009\)](#), esto es, la entrada de una corriente fría desde la parte trasera (oeste) del eco arqueado que forma los mesovórtices más dañinos. En la [figura 24](#) se muestra la advección fría que se produjo desde el mar hacia la línea prefrontal que ya estaba sobre tierra, y la deformación que se produjo en el campo de la temperatura potencial a 2 m de altura. De igual forma, la advección fría en la capa inferior causa, según [Markoski & Richardson \(2009\)](#), la inclinación del eje vertical del vórtice, aspecto también observado en los cortes verticales obtenidos por el SISPI.

En cuanto a los daños que ocasionan los intensos vientos de un tornado, también se conoce que la velocidad tangencial no se distribuye simétricamente, sino que en su sector sudeste, con respecto al movimiento de traslación, es donde se presentan los mayores valores, en el sector izquierdo sólo el 50%, y la parte delantera y trasera un 67% de la velocidad tangencial.

En la [tabla 2](#) se comparan algunas características generales de las superceldas, las minisuperceldas, los mesovórtices de la escala γ asociados a ecos arqueados, y del tornado EF4 en La Habana el 27 de enero. En ella se puede apreciar que las características del tornado EF4 se asemejaron más en varios aspectos a un vórtice de la γ - meso escala dentro del “Sistema Convectivo Cuasi - Lineal” (que constituyó la línea prefrontal), y no a los relacionados con superceldas o minisuperceldas. El asterisco en el SRH señala la advertencia de Weisman y Trapp (2003), de no utilizar este parámetro para las mesovórtices.

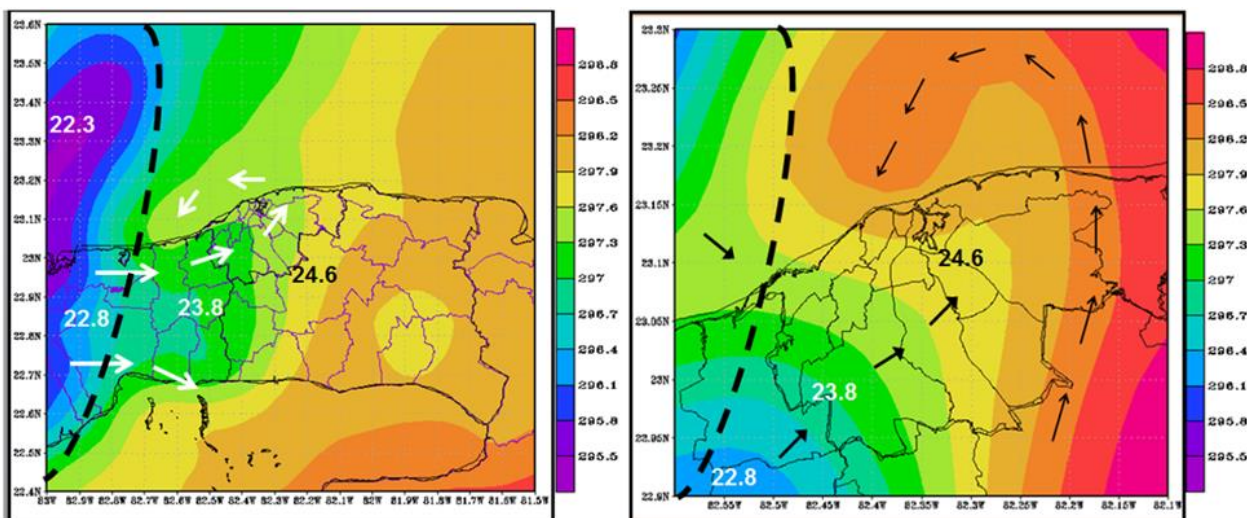


Figura 24. Campo de la temperatura Potencial a 2 m sobre el terreno el 28 de enero a las 0100 UTC. Los grados (K) se muestran en (°C). Fuente: RAP.

Tabla 2. Comparación de algunas características generales de las superceldas, las minisuperceldas, los meso vórtices de la escala γ , y del tornado EF4 en La Habana el 27 de enero de 2019.

Característica	Supercelda	Mini Supercelda	Mesovórtices	EF4
Altura Tope (km)	15 - 20	10	< 4	12
Duración (hora)	2 - 3		1 o menos	< 1
SBCAPE (J/kg)	1840 - 2200	< 600	< 500	491
Variación direcc. (grados)	Fuerte	Mod. - fuerte	débil	20
Fronteras en superficie	---	---	Cond. necesaria	Prefrontal
Circulaciones en la frontera	---	---	Cond. necesaria	Diversos
Crecimiento de Cu y Cb	Anterior	Anterior	Posterior	Posterior
Advección de Vorticidad	descendente	descendente	Ascendente	Ascendente
Inclinación vertical	---	---	Adv. fría	Adv. fría

CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en esta investigación indican que el tornado que afectó la ciudad de La Habana el día 27 de enero de 2019, catalogado por sus daños como un EF4, estuvo dado por la interacción de manera simultánea de condiciones meteorológicas excepcionales a diferentes escalas. Entre esas condiciones pueden mencionarse las siguientes:

- En todo el espesor de la tropósfera solamente se encontró un núcleo de máxima velocidad del viento con 50 m/s, de dirección oestesuroeste, justo debajo del nivel de la tropopausa sobre los 30° N, y no se encontró ninguna otra corriente

en chorro, ni en los niveles bajos ni en los medios;

- La velocidad del viento sobre La Habana aumentó de manera creciente desde superficie hasta la tropopausa, con un punto de inflexión cerca del nivel de 800 hPa, mientras que la dirección varió en la Capa Fronteriza Atmosférica (hasta unos 1476 m de altura) siguiendo primeramente, una distribución muy cercana a una espiral de Ekman; por encima de la Capa Fronteriza Atmosférica existía una pequeña capa de transición para la atmósfera libre; entre el nivel de 760 hPa y hasta los 640 hPa apareció una capa donde únicamente la velocidad vertical fue negativa, coincidiendo con el cambio de la circulación ciclónica de la

baja en el golfo de México en los niveles bajos; mientras que en el resto de la tropósfera hasta la tropopausa, el flujo era del suroeste en aumento constante;

- En los niveles bajos no se encontró la típica capa seca que caracteriza las condiciones de tornados para la planicie central de los Estados Unidos de América. La humedad relativa disminuyó gradualmente (en los 925 hPa era de 100%), hasta un mínimo aproximadamente al nivel de 225 hPa; Con los datos de la estación de Casa Blanca se verificó el efecto de un vórtice tornádico con giro ciclónico de gran magnitud a su entorno inmediato. Se comprobó el paso del tornado con un descenso de la presión en 1.52 hPa en la estación meteorológica, primero que el eje de la línea prefrontal, y posteriormente el frente frío, corroborando lo que se observó en las imágenes de radar y satélite;
- El entorno sobre la región occidental de Cuba presentó condiciones de baja energía convectiva, con valores de la CAPE entre 491 y 900 J/kg. En este caso los valores de la CAPE no favorecían la convección libre;
- No aparecieron indicios de la existencia anticipada de ninguna nube que cumpliera las características de una supercelda clásica, ni una minisupercelda, y que a su vez explicara el desarrollo del intenso tornado;
- Los valores de los índices que comúnmente se emplean, resultaron contradictorios para condiciones de tornados generados por superceldas, ya que los valores umbrales establecidos son válidos en latitudes medias y continentales, no para las condiciones tropicales, ni para tornados no generados por superceldas;

RECOMENDACIONES

1. Profundizar en las condiciones que existían en la circulación general que influyó en la presencia de una vaguada profunda y sus efectos en la ocurrencia del tornado en la Capa Fronteriza Atmosférica;
2. Profundizar en las condiciones en la Capa Fronteriza Atmosférica que provocaron el alto

grado de desarrollo solamente de uno de los vórtices.

REFERENCIAS

- Acosta, G. (2008). La Baja fría como un ambiente sinóptico que favorece la ocurrencia de tornados en Cuba. Estudio de condiciones sub-sinópticas a menor escala. Trabajo presentado en opción al título de Licenciado en Meteorología, Instec. 63 p.
- Aguilar, G., L. Naranjo, & M. Carnesoltas (2005). Establecimiento de condiciones de la circulación atmosférica a escala sinóptica en los alrededores de Cuba, favorables para la aparición de tormentas locales severas. Informe de Resultado Científico del proyecto “Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de Tormentas Locales Severas en Cuba. Un esquema para su predicción”. Instituto de Meteorología, Cuba. 35 p.
- Alfonso, A. P. (1994). Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología. Editorial Academia, La Habana. 168 p.
- Atkins, N. T., & M. St. Laurent (2009). Bow Echo Mesovortices. Part II: Their genesis. Mon. Wea. Rev., 137, 1487-1532.
- Brown, A. & V. T. Wood, (2007). A GUIDE FOR INTERPRETING DOPPLER VELOCITY PATTERNS: Northern Hemisphere. NOAA/ National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, Second Edition June 2007, 55 p.
- Carbone, R., Foote, B., Moncrieff, M., Gal-Chen, T., Cotton, W., Hjelmfelt, M., Roux, F., Heymsfield, G., and Brandes, E., (1980). Convective dynamics: Panel report. Chapter 24, 391-401.
- Carnesoltas, M., A. Varela, M. Sierra, M. T. Llanes, O. Rodríguez, A. Caymares, E. Pila, R. Valdés, M. Gutierrez & L. Ramos, (2019): Tornado que afectó La Habana el 27 de enero de 2019. Informe Científico. Instituto de Meteorología. Depositado en biblioteca. 102 p.
- Carnesoltas, M. & M. Gutierrez, (2019): Diagrama de Energía. Revista cubana de Meteorología, vol. 25, No. 4,

- Davies-Jones, R. P. (1984). Streamwise Vorticity: The origin of Updraft Rotation in Supercell Storm. *J. Atmos. Sci.*, 41, 20, 2991 - 3006.
- Markowski, P. M. & Y. P. Richardson (2009). Tornadogenesis. Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. *Atmos. Res.*, 93, 3-10.
- OMM (1992). Vocabulario Meteorológico Internacional. OMM/No.182, Secretaria de la OMM, Segunda Edición, ISBN 92-63-021182-1.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scale for atmospheric processes. *Bull. Met. Soc.*, 65, 1, 527 - 530.
- Rodríguez, O. (2019). Radares vs Tornado. Centro Met. de Camagüey. 7 p.
- Rotunno, R. & J. B. Klemp (1982). The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Weather Rev.* 110, 136-151.
- Rotunno, R. & J. B. Klemp (1985). On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- Stull, R. B (2015). Practical Meteorology. An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. 938 p. ISBN 978-0-88865-176-1.
- Weisman, M. L., & Klemp, J. B., (1982). The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind and buoyancy. National Center for Atmospheric research, Boulder. CO 80307, 110, 504 - 519.
- Weisman, M. L., & R. Rotunno (2000). The use of Vertical Wind Shear versus Helicity in Interpreting Supercell Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 57, 1452 - 1477.
- Wicker, L.J., & L. Cantrell (1996). The role of vertical buoyancy distributions in miniature supercells. Preprints, 18th Conf. On Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

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/)