

Lluvia localmente intensa. Estudio de casos

Locally Heavy rain. Study cases

Osniel Armas-Forteza ^{1*}, Alis Varela-de la Rosa ¹, Ailyn Justiz-Águila ¹



¹Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología, Cuba.

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

RESUMEN: La lluvia intensa es un fenómeno severo que produce importantes daños en diferentes sectores de la economía y que compromete la seguridad de la población. Sin embargo, existe una escasa comprensión de los mecanismos y factores que a meso-escala favorecen su ocurrencia. En el presente trabajo se realiza un estudio de casos para los cuales predominó la influencia anticiclónica en toda la columna troposférica, situación no favorable para la ocurrencia de precipitaciones. Es por ello que el objetivo principal de esta investigación es determinar el comportamiento a meso-escala de la temperatura, humedad relativa y viento, así como la estructura interna de las tormentas, que favorecen la ocurrencia de lluvia localmente intensa durante el período poco lluvioso para la mitad oriental de Cuba. Se contó con la salida del modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecasting*) para el análisis de los campos de temperatura, viento y humedad. Las observaciones de radar e imágenes de satélite complementaron la información disponible para el análisis de la evolución y estructura interna de las tormentas. Según la salida del modelo WRF los casos de lluvia intensa estudiados se generaron en un ambiente de débil cizalladura vertical del viento desde superficie hasta 6 km. Predominan altos valores de humedad relativa en la capa superficie-850 hPa, una capa seca en niveles medios y temperaturas inferiores a -6°C en 500 hPa. Las celdas convectivas se caracterizan por ser intensas y de rápida evolución. Mientras que las variables de vorticidad, divergencia y velocidad vertical no reflejan un comportamiento homogéneo para los procesos de lluvia localmente intensa.

Palabras clave: Lluvia intensa, meso-escala y modelo WRF.

ABSTRACT: Heavy rain is a severe phenomenon that causes major damage to different sectors of the economy and compromising the safety of the population. However, there is poor understanding of the mechanisms and factors which favor its meso-scale occurrence. In this research a case study presenting conditions anticyclonic influence throughout the tropospheric column, in order to determine the mesoscale behavior of temperature, relative humidity and wind, as well as the internal structure of storms which favor the occurrence of locally heavy rain in six hours in the less rainy period for the half eastern part of Cuba. It featured the output of the numerical model WRF (*Weather Research and Forecasting*) for the analysis of field temperature, wind and humidity. Radar observations and satellite images complement the data available for the study of evolution and internal structure of storms. According to the WRF model output, heavy rain studied cases were generated in an environment of weak vertical wind shear from surface up to 6 km. High relative humidity at the surface-850 hPa layer, a dry layer at middle levels and temperatures below -6°C at 500 hPa were predominant. Convective cells are characterized by intense and rapidly evolving. While variables vorticity, divergence and vertical velocity does not reflect a homogeneous behavior for locally heavy rain processes.

Keywords: Heavy rain, meso-scale and WRF model.

*Autor para correspondencia: Osniel Armas-Forteza. E-mail: osniel.armas@insmet.cu

Recibido: 07/10/2019

Aceptado: 15/01/2020

INTRODUCCIÓN

La lluvia intensa es un fenómeno severo que produce importantes daños en diferentes sectores de la economía y que compromete la seguridad de la población. Según la Organización Meteorológica Mundial ([OMM, 1992](#)) las precipitaciones se clasifican como intensas si igualan o superan un acumulado de 100 mm en 24 horas, 50 mm en 12 horas o 30 mm en 1 hora. La ocurrencia de las mismas se produce en mayor medida con la afectación de sistemas de la β -macro α -meso-escala generadores de precipitación. También pueden estar incentivadas por factores meso-escalares, en cuyo caso se originan en cualquier época del año, pero a menor escala.

La intensidad de la lluvia está dada por la relación entre su acumulado por unidad de tiempo, y siendo la lluvia localmente intensa, como la palabra lo indica, un fenómeno local. Se consideran entonces en esta investigación los casos en que se produjeron montos iguales o superiores a los 50 mm en seis horas o menos en sitios aislados. Este criterio no constituye una violación de la definición dada por la OMM en 1992.

Durante el período poco lluvioso en Cuba (noviembre-abril) las precipitaciones intensas son menos frecuentes debido a la mayor influencia de las altas presiones. No obstante, la afectación de sistemas propios de latitudes medias, como son los frentes fríos y hondonadas pre-frontales, pueden producirlas. Aunque el pronóstico de lluvias resulte en muchas ocasiones sumamente difícil, debido a la variabilidad espacio-temporal de esta variable, es mucho más preciso cuando se basa en la extrapolación del sistema sinóptico que las genera. Sin embargo, hay escenarios meteorológicos en los que las condiciones de la β -macro α -meso-escala son "desfavorables" para la ocurrencia de lluvias intensas, y a pesar de ello estas se producen, siendo estas situaciones mucho más difíciles de predecir.

Para estos casos, es necesario tener en cuenta el comportamiento de algunas variables a una escala inferior a la sinóptica, como la influencia de sistemas y patrones de la meso-escala y de factores físico-geográficos que presenta la región o área en cuestión. No obstante, para una investigación de

los fenómenos meso-escalares necesariamente hay que considerar la escala superior, dado por el acoplamiento que existe entre la β -macro α -meso-escala (la llamada escala sinóptica) y la meso-escala. Su interacción está íntimamente ligada a la génesis y desarrollo de estos fenómenos. Autores como [Farnell y Llasat \(2013\)](#) tuvieron en cuenta la influencia sinóptica y meso-escalar en las tormentas productoras de granizos y las de lluvias intensas. [Garreaud y Rutllant \(1996\)](#) analizaron la situación meteorológica en la gran escala, la escala sinóptica y la escala local que provocaron aluviones en Antofagasta y Santiago de Chile, ambos en Chile.

A pesar de que en Cuba varios son los autores que han tratado el tema de las precipitaciones intensas, la mayor parte de las investigaciones se han encaminado a determinar y describir los sistemas y principales configuraciones de la β -macro α -meso-escala que las producen, sin tener en cuenta la influencia de la meso-escala (Ej: [Orbe \(2009\)](#), [González \(2014\)](#), [Pérez \(2015\)](#) y Planos et al. (2007)). Otro enfoque lo dio [Villate \(2015\)](#) al caracterizar la estructura interna de las configuraciones sinópticas generadoras de lluvia intensa a través del análisis de las variables vorticidad, divergencia, velocidad vertical y humedad.

Por su parte [Irañeta \(2016\)](#) realizó un análisis similar al realizado en la presente investigación, pero limitado a la mitad occidental de Cuba, en dónde existen diferencias significativas en cuanto a las condiciones físico-geográficas que presenta el resto del archipiélago cubano y una menor influencia de la dorsal subtropical. También se encuentra el trabajo elaborado por [Peinó \(2018\)](#) en el cual analizó una serie de casos de estudio en los cuales se conjugó la ocurrencia de lluvia intensa con un fenómeno de tiempo severo, centrándose en las condiciones de la β -macro α -meso-escala y meso-escalares que favorecieron la génesis de dichas tormentas. Sin embargo, la mayoría de los casos analizados estuvo bajo la influencia de algún sistema de la escala sinóptica capaz de favorecer el desarrollo de la convección profunda y organizada, sin dejar de destacar el papel de los sistemas y

procesos de la meso-escala que incentivaron la génesis de la misma.

Esta situación evidencia la necesidad de comprender los factores y mecanismos que a meso-escala favorecen la ocurrencia de lluvia localmente intensa a muy corto plazo en la mitad oriental del país; de ahí que el objetivo general de esta investigación sea: determinar el comportamiento de los campos de temperatura, humedad, viento, el papel de la orografía y la estructura interna de las tormentas que han producido estos eventos.

El artículo está compuesto por tres capítulos, Introducción, Materiales y Métodos, y Análisis de los Resultados; al final del mismo se exponen las conclusiones y recomendaciones. Además, se presentan un total de 13 figuras y una tabla, las que permiten evidenciar más claramente los elementos y resultados señalados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

Cuba posee diferencias poco significativas en cuanto a las condiciones climáticas que caracterizan a sus regiones. Sin embargo, es destacable la superioridad en intensidad y frecuencia con que afecta los sistemas sinópticos durante el período poco lluvioso sobre la mitad occidental del país y la presencia de un relieve más accidentado y complejo en la mitad oriental del archipiélago. Debido a la necesidad de orientar la investigación hacia un área donde las condiciones físico-geográficas y meteorológicas no muestren cambios significativos se decidió dividir al país en dos regiones: la mitad occidental (desde Pinar del Río hasta Sancti Spíritus) y la mitad oriental (desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo); escogiendo esta última como región de estudio. La decisión tomada permite contar con un comportamiento más homogéneo en la serie de datos utilizados. Esta división había sido utilizada anteriormente por [Orbe \(2009\)](#), [González \(2014\)](#) y [Pérez \(2015\)](#).

Las tres provincias más occidentales de la región de estudio, Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas, están constituidas por terrenos predominantemente llanos, con elevaciones que no superan los 443 m de altura, constituida por Sierra

de Jatibonico, en Ciego de Ávila. Esta llanura contrasta con los grupos montañosos Nipe-Sagua-Baracoa y Sierra Maestra ubicados en las provincias de Holguín, Guantánamo, Santiago de Cuba y Granma; elevaciones significativas como Pico Real del Turquino con 1974 m de altura en Santiago de Cuba, Pico Bayamesa con 1756 m de altura en Granma y Pico Cristal en Holguín con 1231 m se destacan en esta región (<http://www.one.cu>). En la [figura 1](#) se puede observar la topografía de la región de estudio.

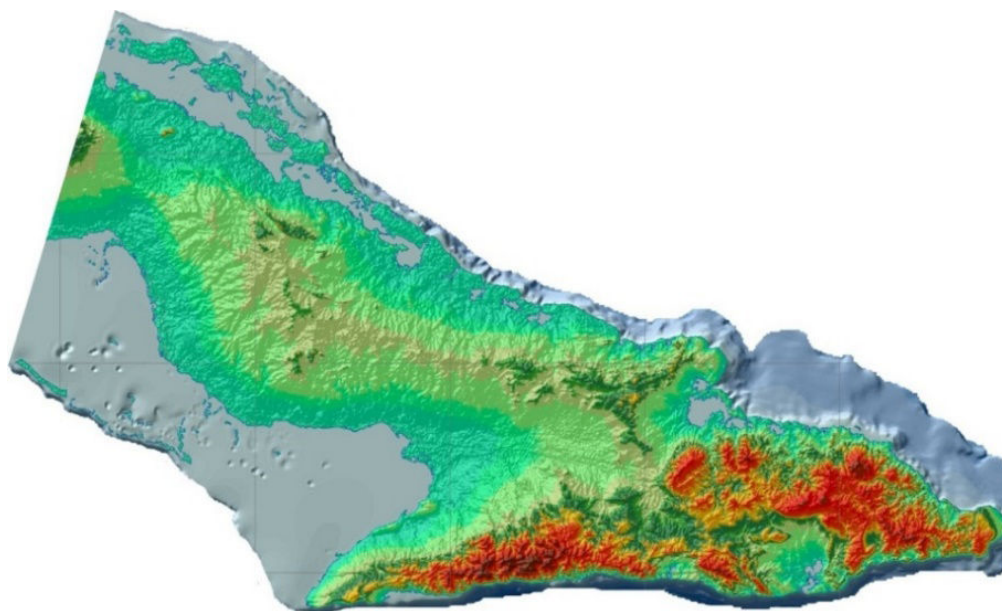
Selección de la muestra

La presente investigación parte del análisis de las observaciones tri-horarias realizadas en el período poco lluvioso desde 2011 al 2013, por las 30 estaciones del servicio meteorológico de Cuba distribuidas en la mitad oriental de este archipiélago. Esta información forma parte de la base de datos que posee el Centro del Clima, Instituto de Meteorología (INSMET). Se seleccionaron solo aquellos días que cumplieran con el requisito de acumulados iguales o superiores a 50 mm en 6 horas o menos.

Debido a que el objetivo fundamental de este trabajo es determinar las condiciones meteorológicas que a meso-escala contribuyeron a los procesos de precipitación, no se tuvo en cuenta la influencia directa de sistemas meteorológicos de la β -macro α -meso-escala, que pudieran incentivar estos procesos. Por tanto, se seleccionaron aquellos días en que la región de estudio se encontraba bajo influencia anticiclónica en toda la columna troposférica. Teniendo en cuenta los criterios y requisitos impuestos anteriormente, en esta investigación se escogieron 9 días, reflejados en la [tabla 1](#).

Variables y herramientas utilizadas

Para el análisis del ambiente sinóptico que influyó y condicionó la ocurrencia de lluvias de tal intensidad se utilizaron los mapas sinópticos de presión en superficie y geopotencial en los niveles de 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 200 hPa, en los horarios 0000Z, 0600Z, 1200Z y 1800Z para cada uno de los días seleccionados. Los mapas antes mencionados fueron extraídos del sitio web



Fuente: <https://aires.google.com/site/castellanosresearch/Annex4A.jpg>

Figura 1. Topografía de la mitad oriental de Cuba

Tabla 1. Relación de los días seleccionados como casos de estudio.

Fecha	Horario (UTC)	Est. Meteorológica	Acumulado (mm)
16/01/2011	21:00-00:00	(377) Veguitas	61,6
27/03/2011	18:00-21:00	(334) Palenque de Yateras	62,4
07/04/2013	03:00-06:00	(370) Guaro	55,0
07/04/2013	21:00-00:00	(371) Pinares de Mayarí	53,0
08/04/2013	21:00-00:00	(351) Santa Cruz del Sur	65,0
12/04/2013	18:00-00:00	(371) Pinares de Mayarí	59,0
30/04/2013	18:00-21:00	(334) Palenque de Yateras	50,0
15/04/2014	18:00-00:00	(357) Las Tunas	64,0
15/11/2014	18:00-21:00	(356) Jamal	97,0
21/11/2014	21:00-00:00	(345) Júcaro	102,0

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/> del National Center for Atmospheric Research (NCAR por sus siglas en inglés).

El espacio sinóptico está comprendido entre los 10°N-50°N y los 60°W-110°W (figura 2), con una resolución horizontal de 2.5°. Esta área es lo suficientemente amplia para visualizar y analizar las configuraciones y sistemas meteorológicos, tanto de latitudes medias como de la zona tropical, que pudieran influir sobre la región de estudio.

Otra herramienta utilizada fueron las imágenes de satélite del GOES 13 en el canal 1,

correspondiente al espectro visible con resolución de 1 km, y el canal 4, correspondiente al espectro infrarrojo con resolución espacial de 4 km. Las imágenes de satélite se obtuvieron del sitio web <http://www.nsof.clases.noaa.gov/sala/productos/welcome>.

Además, se analizaron las observaciones del radar meteorológico para 6 de los 9 días en estudio, facilitadas por el Centro de Radares, en la provincia de Camagüey. A partir de las observaciones de radar y con la utilización del software Vesta Process en su versión 5.3.19.2,

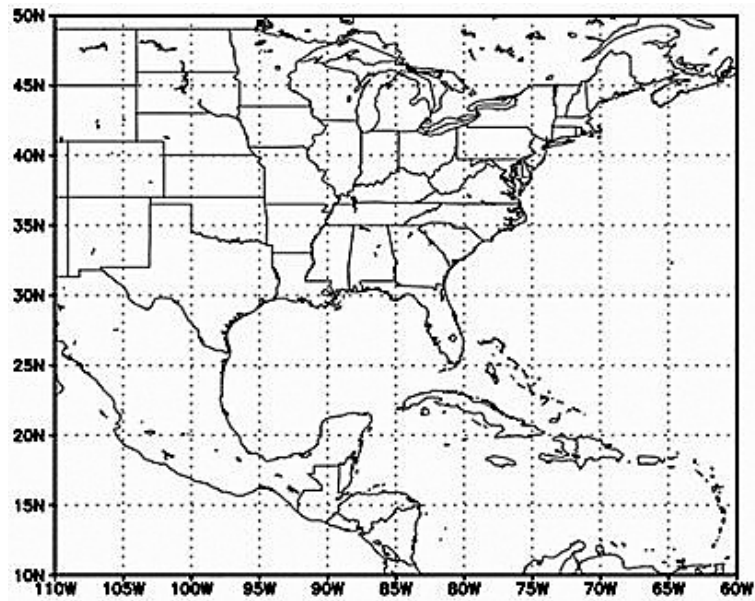


Figura 2. Espacio sinóptico.

desarrollado por especialistas del Centro de Radares, se analizaron algunas de las variables radáricas propuestas por [Gamboa \(2004\)](#) para el análisis de las Tormentas Locales Severas.

Modelo numérico

La utilización de los Modelos Numéricos de Predicción del Tiempo (MNPT) se ha convertido en una herramienta muy eficaz para la práctica operativa en el Centro de Pronósticos del Tiempo (CPT), a la vez que permite realizar un estudio tridimensional de la atmósfera a partir del análisis de la variada gama de productos que estos ofrecen. Teniendo en cuenta además que en Cuba se utilizan MNPT orientados al pronóstico de meso-escala, con una resolución espacial y temporal capaz de simular fenómenos y procesos de escala regional y local, a muy corto (menos 12 horas) y corto plazo (24 a 72 horas), estos se convierten en la base fundamental para el estudio de casos de lluvia localmente intensa.

A partir del Sistema de Predicción Numérica Océano Atmósfera (SPNOA) operativo en el Centro de Física de la Atmósfera del INSMET, se analizaron 4 casos de estudio. El SPNOA está conformado por un conjunto de modelos numéricos de última generación ([Pérez et al. 2014](#), [Mitrani et](#)

[al. 2019](#)). Dentro de ellos se utiliza el WRF (Weather Research and Forecasting) en su versión 3.5.1, a partir del cual se realizan pronósticos hasta 72 horas de las principales variables atmosféricas. El WRF es inicializado con la salida numérica de las 0000 y 1200 UTC del modelo global GFS (Global Forecast System), con 0.5 grados de resolución espacial. Cuenta con dos dominios de simulación anidados bidireccionalmente con 18 y 6 km de resolución espacial (ver [figura 3](#)), centrados en los 22 grados de latitud Norte y en los 80 grados de longitud Oeste con proyección Lambert Conformal y en la vertical se emplean 30 niveles. En esta investigación se utiliza el dominio de más alta resolución. La configuración física del WRF es: para la radiación de onda larga, RRTM (Mlawer et al. 1997); para la radiación de onda corta, Dudhia (Dudhia, 1989); para la microfísica, se utiliza el esquema de Lin (Lin, Farley and Orville, 1983) y para la formación de cúmulos, es usada Kain-Fritsch (Kain, 2004).

Las variables meteorológicas e índice que se utilizaron de la salida del modelo WRF fueron: la humedad relativa, la temperatura del aire, la cizalladura vertical del viento, la vorticidad, la divergencia, la velocidad vertical, el Nivel Condensación por Ascenso (NCA), la Energía

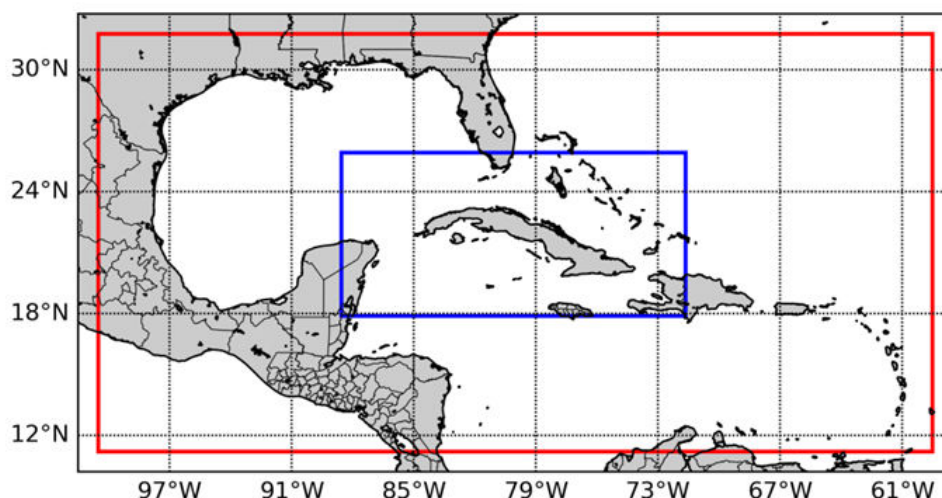


Figura 3. Dominios de simulación del modelo WRF, utilizados en SPNOA. El rectángulo rojo corresponde con el dominio de 18 km de resolución mientras que el rectángulo azul delimita el dominio de 6km de resolución.

Convectiva Potencial Disponible (CAPE, por sus siglas en inglés), la Inhibición Convectiva (CIN, por sus siglas en inglés), el Índice de Levantamiento (LI, por sus siglas en inglés) y la dirección e intensidad del viento.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

Mapas de Re-análisis

La influencia de la β -macro α -meso-escala sobre la γ -meso α -micro-escala es indiscutible, de ahí que sea necesario conocer el comportamiento que a esta escala tengan algunas de las variables generadoras de la convección y propiamente de la precipitación. Por esta razón se realiza un estudio de las variables temperatura, divergencia, cizalladura vertical del viento, humedad, dirección e intensidad del viento y vorticidad, a partir de los mapas de re-análisis en los niveles mandatorios, y para la cizalladura, las capas 1000-600 hPa y 1000-850 hPa.

La altura de la isoterma 0 °C se encontraba ligeramente por encima del nivel de 600 hPa, mientras la temperatura del aire en 500 hPa se tomó valores entre -4 y -11 °C, sin embargo, en seis de casos fue inferior a -7 °C. Estos valores de temperatura favorecen la formación de gotas de agua de gran diámetro e incluso la formación de

granizos de gran tamaño, que puedan llegar a la superficie sin derretirse.

La divergencia para los casos de estudio modularmente osciló entre 0 y $1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, en los niveles superiores tiende a ser negativa, mientras en los niveles medios tomó generalmente valores positivos. Para 850 hPa hubo convergencia en el horario previo a la precipitación y divergencia después de ésta, mientras que en 1000 hPa solo fue negativa en dos casos de estudio (7 de abril de 2013 y 21 de noviembre de 2014). En cuanto a la vorticidad fue negativa (anticiclónica) en todos los niveles analizados, tomando valores modulares entre 0 y $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, siendo más significativos cuantitativamente en los niveles superiores. La presencia de divergencia en las capas bajas y medias en la mayoría de los casos, así como la vorticidad anticiclónica en toda la columna troposférica, estuvo relacionada con la marcada influencia anticiclónica que imperaba en cada caso de estudio. Lo que permite inducir que el ambiente sinóptico no estaba aportando las condiciones necesarias para la ocurrencia de este tipo de lluvia intensa.

La cizalladura vertical del viento fue negativa para las capas 1000-600 hPa y 1000-850 hPa,

indicando una disminución de la velocidad del viento hacia el nivel superior. El valor modular en la capa 1000-600 hPa fue superior a los $0.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y alcanzó hasta $1.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Para la capa 1000-850 hPa la cizalladura del viento varió entre 0 y $2.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, en siete casos estuvo alrededor de los $1.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. La débil cizalladura favorece el ascenso vertical de la parcela y limita el mezclamiento con el ambiente más seco a medida que alcanza los niveles medios, permitiendo la concentración y acumulación de agua dentro de la nube.

Una capa seca se encontró en el nivel de 500 hPa, donde la humedad no superó el 35% en todos los casos de estudio, mientras que existe un ligero aumento para el nivel de 700 hPa en donde fue superior al 25% y hasta 60%. Para el nivel de 850 hPa se observó una mayor humedad en comparación con el resto de los niveles, oscilando entre 40 y 70%, en 7 casos fue mayor al 50%. El nivel que más aportó humedad fue el de 1000 hPa, donde se observaron valores elevados, entre 70 y 90%. Esta distribución de la humedad, con altos valores en niveles bajos, constituye la primera condición necesaria para el inicio de la convección en Cuba, según [Carnesoltas, M. et al. \(2013\)](#), así como la presencia de aire seco en niveles medios favorece la intensidad de las corrientes descendentes, que incrementa la severidad de la tormenta.

Los movimientos verticales no poseen un comportamiento bien definido, presentaron tanto ascensos como descensos del aire sin importar el horario en el que se analizaron. El valor máximo encontrado fue $0,22 \text{ Pa/s}$ siendo 400 hPa el nivel de mayor intensidad, sin embargo, fueron más frecuentes los valores inferiores a $0,1 \text{ Pa/s}$. Todo esto evidencia que los movimientos verticales bajo condiciones anticiclónicas en casi toda la columna troposférica resultan débiles.

El viento tendió a girar dextrógiro desde el nivel de 1000 hPa hasta 200 hPa, entre el primer y segundo cuadrante en los niveles inferiores hasta el cuarto cuadrante en el nivel de 200 hPa (7 casos de estudio), manteniéndose desde 500 hPa hasta 200 hPa una componente del oeste. En cuanto a la

intensidad del viento tendió a disminuir desde 1000 hPa hasta 700 hPa, para luego aumentar nuevamente. El valor máximo se presentó en 200 hPa, superior a 20 m/s, mientras que en 700 hPa nunca superó los 5 m/s ([figura 4](#)). Esta distribución de la cizalladura direccional del viento contribuyó a la organización y desarrollo de la convección, aportándole vorticidad al ambiente sinóptico.

Análisis de las observaciones de satélite

A partir del análisis de las imágenes de satélite se comprobó la existencia, desde horas tempranas de la mañana (a partir de las 1400 UTC) de Rollos Convectivos Horizontales (HCR, por sus siglas en inglés) sobre el área de estudio, la [figura 5](#) es representativa de la mayoría de los casos.

El flujo predominante en gran parte de los casos de estudio (7 casos) se observó de región nordeste, apareciendo el frente de brisa de mar hacia zonas de la costa sur. La presencia de este sistema en combinación con los HCR existente, fue el detonador principal para la convección profunda y organizada, coincidiendo con lo planteado por [Carnesoltas \(2002\)](#) ([figura 6a](#)), posibilitando que la convección se concentrara hacia zonas del interior y sur del área.

La existencia de topes penetrantes y Ci spissatus con temperaturas muy frías, encontrada en las imágenes de satélite en gran parte de los casos analizados, denota la convección profunda ([figura 6b](#)) que comúnmente se extendió hasta horas de la noche. La presencia de potentes Cb sobre o muy cerca de la estación meteorológica coincide con los horarios en que la precipitación fue reportada.

El 15 de noviembre de 2014, la convección no estuvo relacionada con la combinación del frente de brisa con los HCR. Este día la convección, aunque profunda ([figura 7a y 7b](#)), se concentró solamente en las inmediaciones de la estación, estimulada, al parecer, por el complejo relieve que rodea a la estación meteorológica de Jamal, Guantánamo ([figura 8](#)). Esta situación, unido a la persistencia y el lento movimiento de la celda, propició la ocurrencia de tan importante acumulado (97 mm en 3 horas).

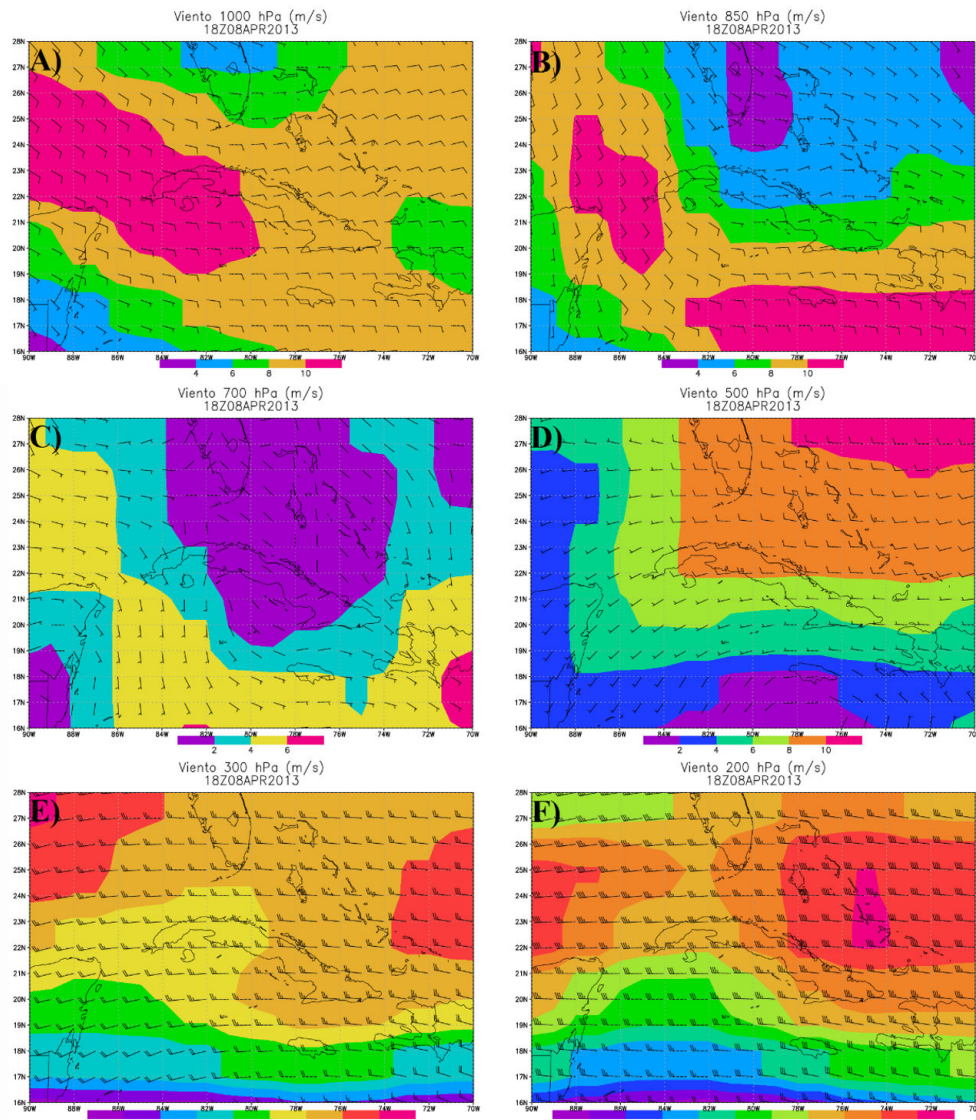


Figura 4. Mapas de re-análisis de viento. a) 1000 hPa, b) 850 hPa, c) 700 hPa, d) 500 hPa, e) 300 hPa y f) 200 hPa, del 8 de abril de 2013 a las 1800 UTC.

Análisis de las observaciones de radar

El análisis de las observaciones de radar solo se pudo realizar en 6 de los 9 casos de estudio, debido a la calidad de las observaciones, pues algunas presentaban una resolución temporal no representativa para el fenómeno y en otros casos el radar se encontraba a gran distancia de las celdas generadoras de la precipitación.

A partir de las observaciones de radar se determinaron los valores de varias variables

radáricas durante la mayor parte del proceso de génesis, desarrollo y disipación de las celdas que afectaron a cada una de las estaciones meteorológicas y sus alrededores.

La máxima reflectividad encontrada durante la evolución de las celdas analizadas fue mayor a los 50 dBz en 5 de los 6 casos estudiados, encontrándose como máximo valor 64 dBz. Estos valores evidencian el potencial severo que presentaban las celdas que generaron las lluvias. La altura de la máxima reflectividad en 5 casos de

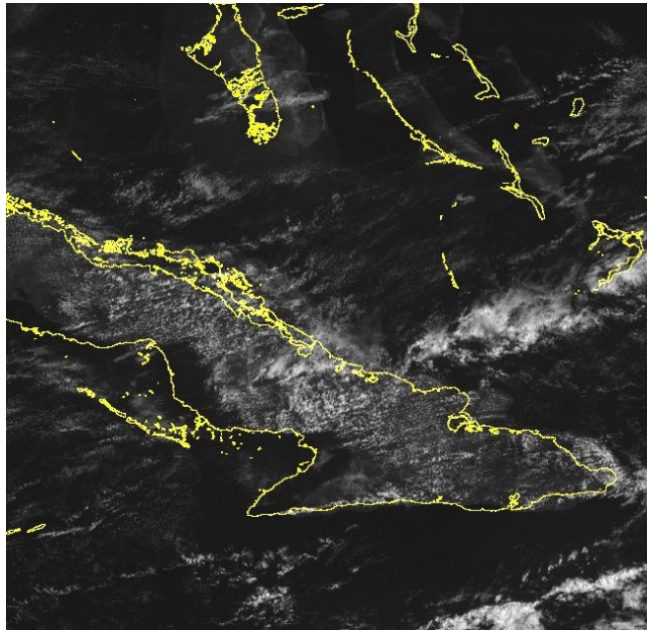


Figura 5. Imagen de satélite visible en la que se observan HCR (08/04/2013, 14:45 UTC)

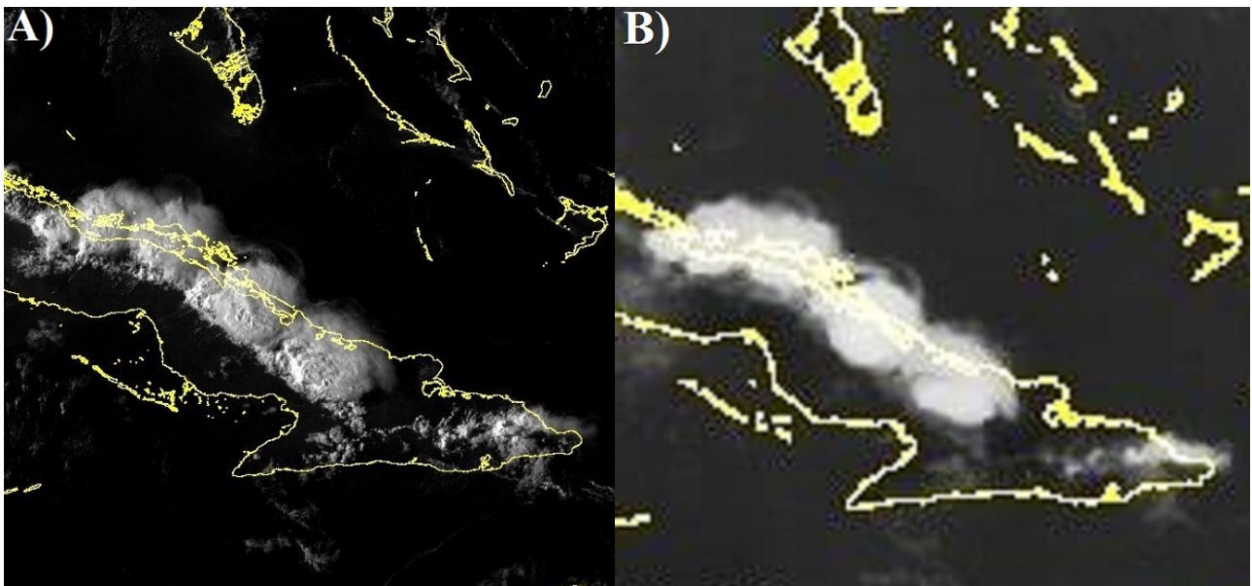


Figura 6. Imagen de satélite (15/04/2014, 20:15 UTC): a) Visible, se aprecia convección profunda, b) Infrarroja, se observan topos fríos.

estudio estuvo por encima de los 3 km, encontrándose en un caso, aproximadamente en los 5,8 km.

Durante el estadio de mayor desarrollo o cercano a este, los topos de las celdas convectivas alcanzaron valores superiores a los 12 km, excepto en dos casos de estudio, donde los topos se

encontraban limitados por la baja cantidad de exploraciones horizontales y la relativa larga distancia a la que se encontraba la celda del radar meteorológico más cercano, operativo en ese momento. El mayor valor alcanzado fue de 19,2 km de altura ([figura 9](#)).

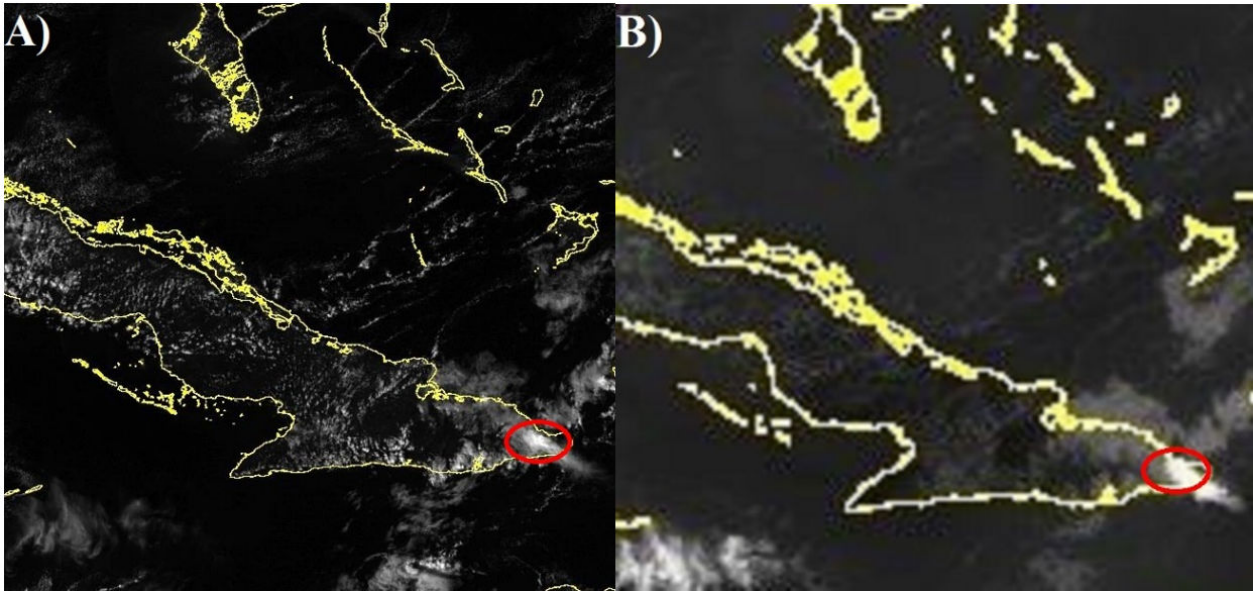


Figura 7. Imagen de satélite (15/11/2014, 19:00 UTC): a) Visible, se observa la convección aislada, b) Infrarroja, topos fríos.

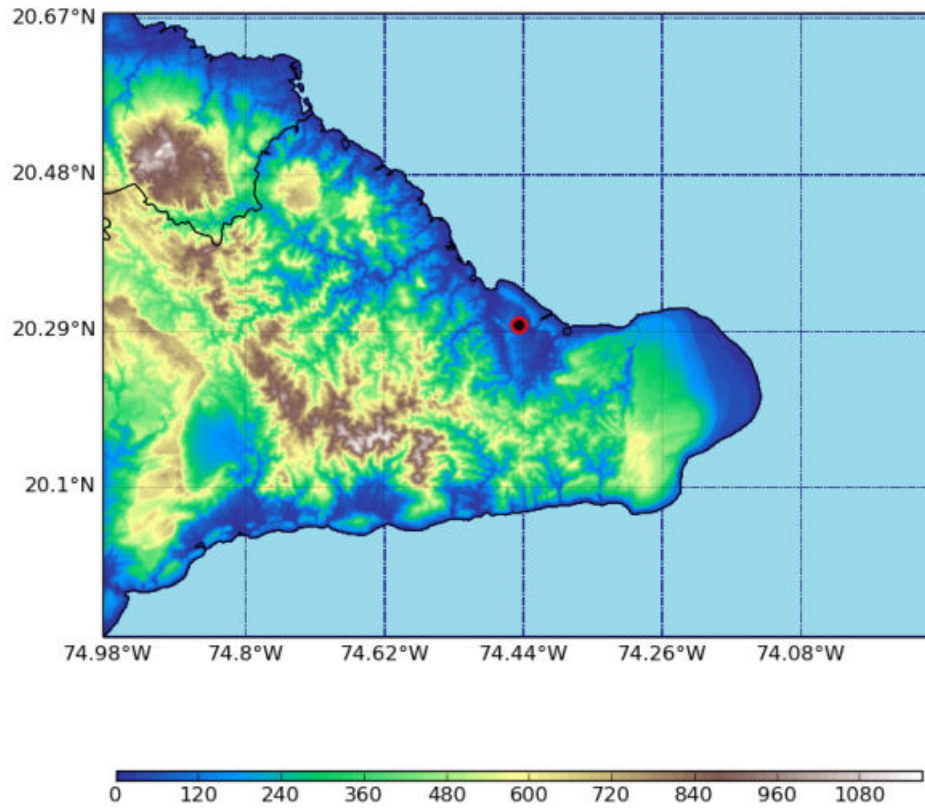


Figura 8. Ubicación de la estación meteorológica de Jamal.

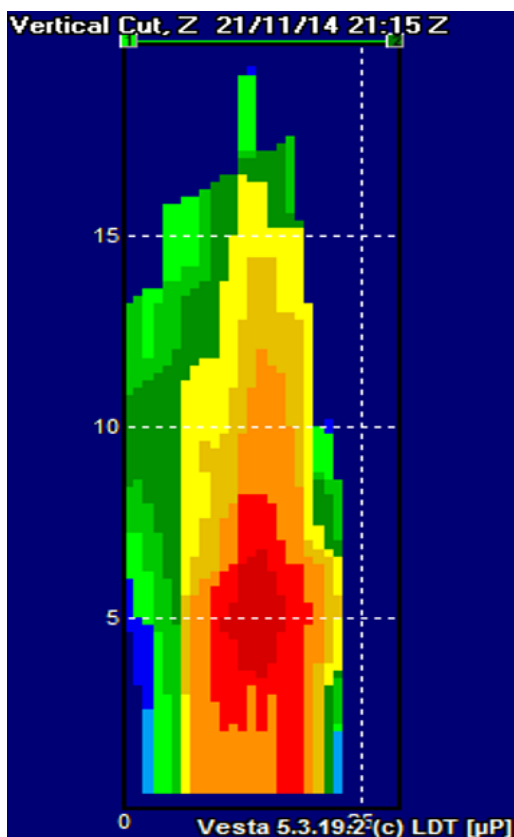


Figura 9. Corte vertical de una celda convectiva (21/11/2014, 21:15 UTC).

Estos resultados son característicos de celdas con corrientes ascendentes muy fuertes, capaces de elevar y concentrar grandes volúmenes de agua e incluso granizo durante más tiempo en su ciclo de vida. Esto lo demuestran los valores del VIL máximo encontrado durante la etapa de madurez de las tormentas, los cuales superaron los 50 kg/m^2 , encontrándose como valor máximo 106 kg/m^2 . Los valores de máxima densidad de VIL fueron superiores a 4 g/m^3 .

De forma general los resultados encontrados demuestran los importantes acumulados de agua que sostenían las tormentas analizadas, y además, se encuentran en el rango que caracteriza a las tormentas severas según el estudio realizado por [Gamboa \(2004\)](#).

Se comprobó que en 5 de los 6 casos estudiados la lluvia localmente intensa a muy corto plazo fue generada por más de una celda convectiva, las que

evolucionaban rápidamente, con un tiempo de vida de las tormentas entre 30 y 60 minutos, aunque en uno de los casos (21 de noviembre de 2014), donde los topes máximos alcanzaron los 19,2 km de altura ([figura 9](#)) la tormenta tuvo una duración de más de una hora.

Generalmente se observaron ecos fuertes alineados a lo largo del Frente de Brisa (FB) B, ver [figura 10](#).

Solo en un caso de estudio (12 de abril de 2013) los valores de máxima reflectividad fueron inferiores a 50 dBZ ([figura 11](#)). Este caso coincide con la estación Pinares de Mayarí, Holguín, estación montañosa, donde los acumulados de precipitación están justificados en gran medida por la complejidad del relieve en donde se encuentra enclavada la estación meteorológica, además que la celda que la afectó se movió perpendicular al sistema montañoso.

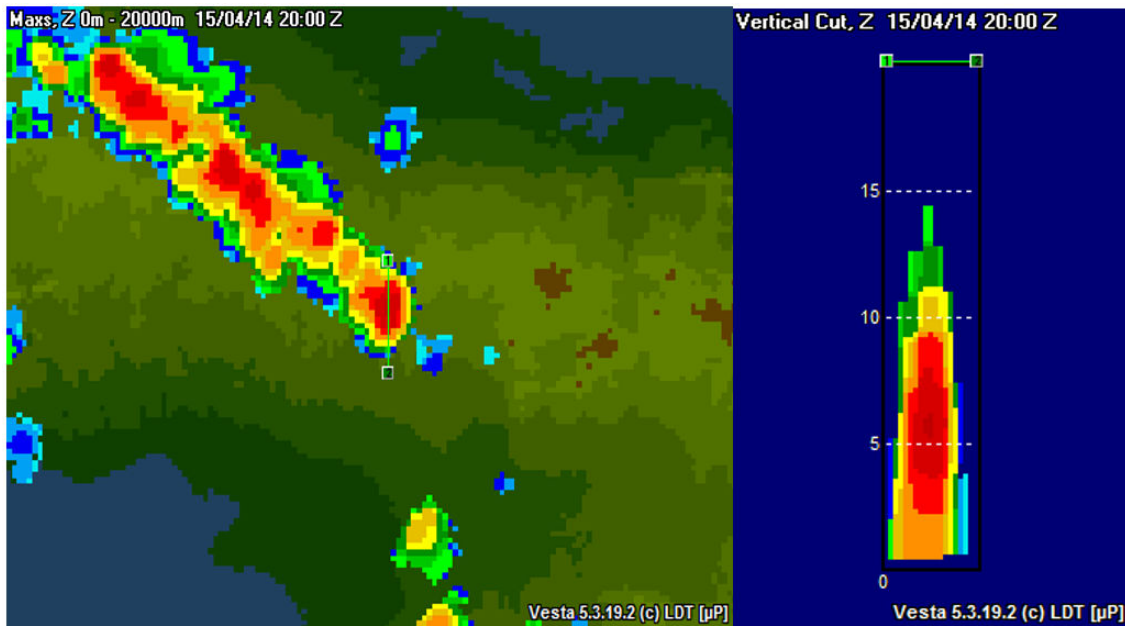


Figura 10. Observación de radar (15/04/2014, 20:00 UTC). A la izquierda: ecos alineados delimitando la frontera del frente de brisa, a la derecha: corte vertical de la celda, se observa el núcleo de máxima reflectividad aislado y elevado, topes igualmente elevados.

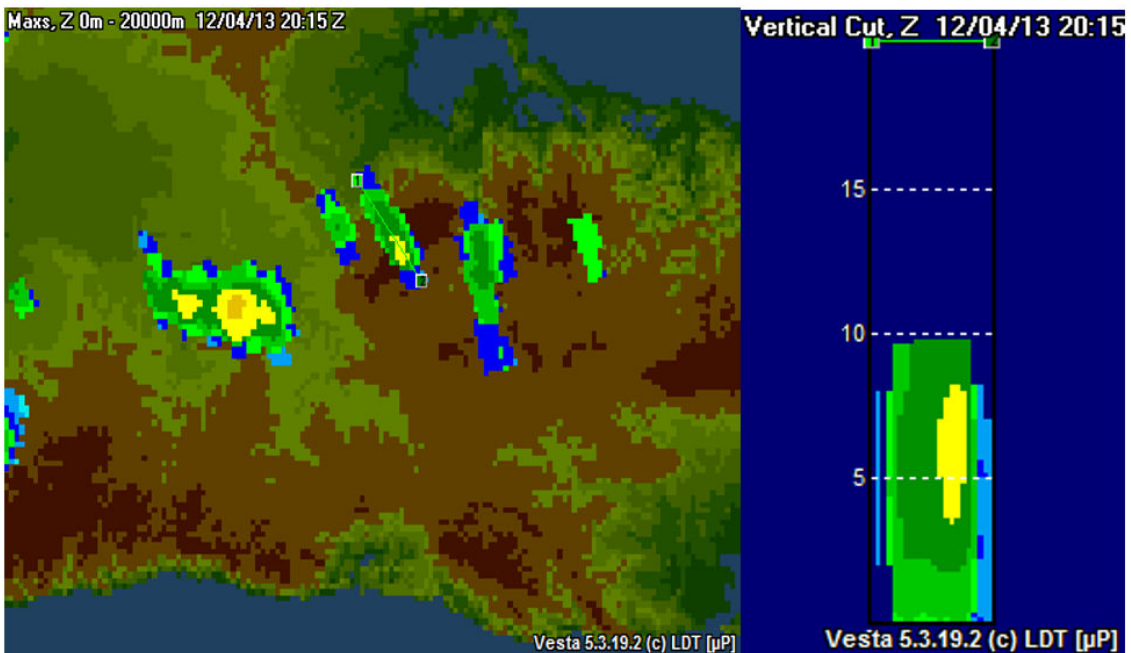


Figura 11. Observación de radar (12/04/2013, 20:15 UTC). A la izquierda: máximos de reflectividad, a la derecha: corte vertical de la celda.

Análisis a meso-escala de las variables e índice termodinámico, a partir de las salidas del modelo numérico WRF

Todo lo anteriormente expresado en esta investigación conlleva a concluir que, bajo un ambiente anticiclónico, los casos de estudio considerados están incentivados por condiciones a meso-escala, teniendo como mecanismo de inicio de la convección la combinación del frente de brisa con los HCR o la interacción de las celdas con el relieve montañoso de la región oriental de Cuba. Por tal razón se hace un análisis por medio de las corridas del WRF de las condiciones meteorológicas y termodinámicas que a meso-escala influyeron en estos procesos de lluvia. Para ello se consideraron, además, un conjunto de niveles o superficies isobáricas que sólo brinda el modelo numérico y que favorece la interpretación del comportamiento en la vertical de las variables meteorológicas analizadas.

La altura de la isoterma 0 °C se identificó a partir de los sondeos termodinámicos generados por GrADS (figura 12), encontrándose la misma ligeramente por encima del nivel de 600 hPa, inferior a los 5 km de altura. Este comportamiento es común para las condiciones tropicales e insulares de Cuba (Carnesoltas, comunicación personal). Sin embargo, la temperatura en 500 hPa fue menor a -6 °C, en 3 de los 4 casos de estudio, incluso inferior a los -7 °C. Estas temperaturas favorecen la presencia de granizos de gran tamaño dentro de las celdas convectivas, por lo que, en su descenso hacia la superficie, aunque llegan a fundirse, constituyen grandes gotas de lluvia que intervienen en los fenómenos de colisión coalescencia e incrementan el monto de las precipitaciones.

La humedad relativa en la capa 1000-850 hPa fue superior al 70%, siendo los niveles que más aportaron humedad 900 y 950 hPa, con valores,

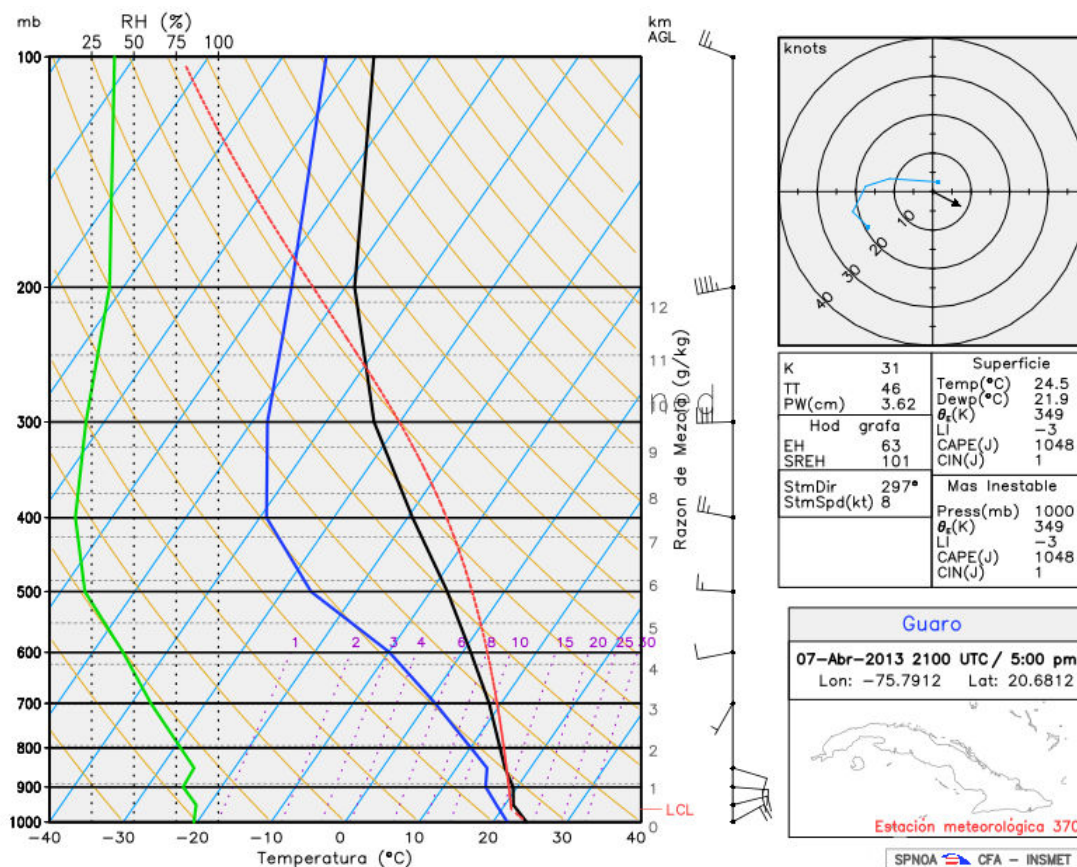


Figura 12. Ejemplo de sondeo termodinámico (7 de abril de 2013, 2100 UTC)

generalmente, entre 80 y 100%. En 700 hPa osciló entre 30% y hasta 75%, mientras en 600 hPa fue inferior al 60%. La capa más seca se encontró entre los niveles de 500 y 400 hPa, donde por lo general no alcanzó valores de 40% e incluso tuvo un valor promedio del 15 % el 8 de abril de 2013. Estos valores están estrechamente vinculados al comportamiento del viento en la columna troposférica, puesto que una componente del oeste se mantuvo en la capa 600-200 hPa para todos los días analizados, reduciendo el contenido de humedad. Mientras que fue del sur en 850 y 700 hPa en los tres casos de estudio en el que existe un giro dextrógiro del viento, lo que favoreció la advección de humedad.

La cizalladura vertical del viento en intensidad para la capa superficie (sfc)-700 hPa fue negativa en todos los casos de estudio, indicando una disminución de la velocidad del viento en el nivel superior. El valor modular de esta variable fue bajo, presentando en la mayoría de los casos valores no superiores a los $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, resultado que coincide con lo encontrado por [Peinó \(2018\)](#) e [Irañeta \(2016\)](#). Para sfc-850 hPa la cizalladura vertical del viento no tuvo un comportamiento homogéneo, siendo en dos casos positiva y en dos negativa, con valores modularmente inferiores a $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. La capa sfc-500 hPa es siempre positiva, además es superior a los $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ en dos casos, y el valor máximo es de $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. La débil cizalladura, que por lo general imperó en los casos de estudio favoreció el desarrollo de la convección y la organización de la nube de tormenta desde los niveles bajos. El fortalecimiento de la corriente ascendente se produce a partir de la energía potencial convectiva y del elevado por ciento de humedad, disponibles en el ambiente; mientras el tiempo de vida de la tormenta está limitado por el acoplamiento de las corrientes ascendentes y descendentes de la celda. Esto también provoca que las gotas de lluvia precipiten dentro de la propia nube, con muy poca evaporación de las mismas, posibilitando incluso que siga su crecimiento por los procesos de colisión-coalescencia con otras gotas en su caída.

La vorticidad, en general, no mostró a esta escala un claro comportamiento. Entre los niveles de 400 y 100 hPa se encontraron valores negativos (anticiclónica), que no superaron los $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Entre los 700 y 500 hPa esta variable fue positiva solo el 8 de abril de 2013, variando entre 0 y $3.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; mientras para 950, 900 y 850 hPa hubo vorticidad ciclónica el 7 de abril de 2013, el valor más elevado fue de $2.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, aunque fue casi siempre inferior a $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. En el nivel de 1000 hPa la vorticidad no posee un comportamiento bien definido. Los valores de esta variable según el estudio a meso-escala son superiores a los obtenidos por re-análisis.

La divergencia fue comúnmente negativa para los niveles de 300, 200 y 100 hPa, el máximo valor es de $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ aunque suele ser inferior a $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. En 600, 500 y 400 hPa solo el 12 de abril de 2013 mantuvo valores positivos en todos estos niveles, los demás mostraron un comportamiento muy heterogéneo. Para los niveles inferiores, excepto para 1000 hPa donde existió siempre convergencia y se alcanzó hasta $4.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, los valores negativos y positivos están divididos en 2 casos de estudio cada uno, y frecuentemente no superaron los $1.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. El comportamiento de esta variable tampoco mostró un resultado concluyente, aunque se aprecia una relación más clara con lo encontrado por el re-análisis.

Los movimientos verticales fueron ascendentes en solo dos casos de estudio desde niveles bajos hasta 500 hPa, predominando en la tropósfera alta los movimientos descendentes. Los valores de esta variable son poco significativos, el máximo valor fue de 0,18 m/s aunque en la mayoría de los casos analizados los valores eran inferiores a 0.10 m/s.

Los resultados obtenidos para las variables vorticidad, divergencia y velocidad vertical no son concluyentes y no caracterizan al fenómeno analizado. Estos valores sugieren que la escala espacial y temporal del modelo WRF utilizada en esta investigación, no es representativa de la escala de las tormentas que producen lluvias localmente intensas, ya que la resolución empleada por el modelo no es capaz de simular la estructura y evolución de las tormentas aisladas.

Coincidiendo con lo encontrado en los datos obtenidos por re-análisis, la dirección del viento mostró un giro dextrógiro, del primer cuadrante en el nivel de 1000 hPa hasta el cuarto cuadrante en 200 hPa. La intensidad del viento en estos casos disminuye hacia el nivel de 700 hPa, ascendiendo a partir de este nivel hasta alcanzar valores de 15 m/s en el nivel de 200 hPa. Solo uno de los casos, referente a la estación de Pinares de Mayarí presentó un movimiento levógiro en la dirección del viento, (figura 13).

El NCA reflejado por el modelo estuvo entre 200 m y 500 m en el horario previo a la precipitación, por lo que, con un débil empuje dinámico o mecánico, que ya existía en el área debido a la presencia del frente de brisa de mar y el propio empuje orográfico permitió que la masa de aire fuera capaz de comenzar a condensarse.

La CAPE fue superior a los 1000 J/kg, más elevada siempre antes de la precipitación, solo en un caso de estudio fue inferior, aunque alcanzó los 930 J/kg. Estos valores de energía son suficientes para generar tormentas convectivas de fuertes corrientes ascendentes, lo que se demuestra con los valores de los toques máximos obtenidos por el radar meteorológico.

El LI siempre es inferior a cero, entre -2 y -3, incluso de -5 para uno de los días estudiados, por debajo de cero es favorable a la convección e inferiores a -4 aumentan el potencial de convección severa.

El comportamiento de la CIN fue positivo para el desarrollo de la convección, la energía que poseía el ambiente para limitarla fue muy pequeña, con valores que no superaron el 1 J/kg, y sólo es mayor a este valor después de reportada la

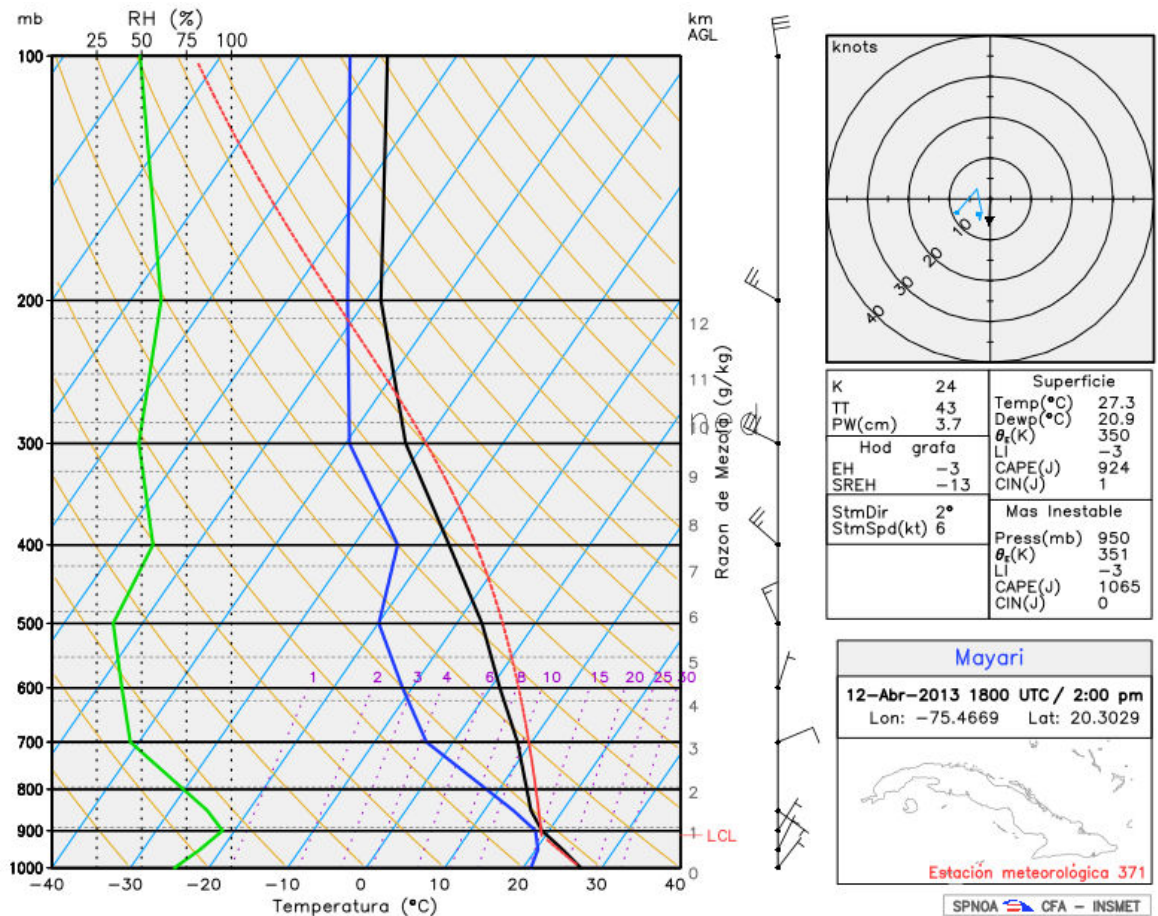


Figura 13. Sondeo termodinámico del 1 de abril de 2013, estación Pinares de Mayarí.

precipitación. Esto continúa evidenciando que, aunque el ambiente sinóptico no era el idóneo para la formación de la convección por la marcada influencia anticiclónica que predominaba, el empuje a meso-escala con altos valores de humedad en las capas bajas, así como gran cantidad de energía acumulada en el ambiente fueron los detonadores de estos episodios de lluvia intensa.

CONCLUSIONES

- Según la salida del modelo WRF los casos de lluvia intensa estudiados se generaron en un ambiente de débil cizalladura vertical del viento desde superficie hasta 6 km. Predominaron altos valores de humedad relativa (>70%) en la capa superficie-850 hPa, una capa seca en niveles medios (<35%), temperaturas inferiores a -6 °C en 500 hPa y la isoterma de 0 °C ligeramente sobre los 600 hPa.
- Las celdas convectivas se caracterizaron por ser intensas y de rápida evolución, con reflectividad superior a 50 dBz y topes por encima de los 12 km de altura.
- Las variables de vorticidad, divergencia y velocidad vertical no reflejaron un comportamiento homogéneo para los procesos de lluvia intensa bajo condiciones de influencia anticiclónica.
- La orografía influyó en el desarrollo de la convección y la eficiencia de las precipitaciones.
- En las imágenes de satélite se halló que el principal mecanismo que incentiva la convección profunda y organizada fue la interacción del frente de brisa con los HCR hacia el interior o próximo al litoral del archipiélago cubano.

RECOMENDACIONES

- Ampliar el estudio con un mayor número de casos.
- Utilizar las salidas del modelo WRF con una mayor resolución espacial y temporal.

AGRADECIMIENTOS

A Maibys Sierra por su especial colaboración en la elaboración de este artículo, por realizar las corridas del modelo WRF, dar sus oportunas y bien señaladas críticas, además de su entera disposición a ayudar. A Elier Pila por facilitar los mapas de re-análisis y las imágenes de satélite. A Rafael en el Centro de Radares por proporcionarnos toda la información de radar disponible.

REFERENCIAS

- Carnesoltas, M. et al., (2013) *Factores físicos que influyen en la caída de granizo y en las aeroavalanchas sobre Cuba*. Informe de Resultado, La Habana, 65 pp.
- Carnesoltas, M., (2002) “La brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales”. *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1): 39-60, ISSN: 0864-151X.
- Farnell, C. y Llasat, M. C., (2013) *Proposal of three thermodynamic variables to discriminate between storms associated with hail and storms with intense rainfall in Catalonia*. Departamento de Astronomía y Meteorología, Universidad de Barcelona, Barcelona, *Journal Mediterranean Meteorology & Climatology*, Tethys 10, pp. 25-34.
- Gamboa, F., (2004) *Selección de indicadores radáricos como predictores de severidad*. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Ciencias Meteorológicas, La Habana, 55 pp.
- Garreaud, R. y Rutllant, J., (1996) *Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993*. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Chile, 271 pp.
- González, M. I., (2014) *Lluvia intensa en el período poco lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 75. pp.
- Irañeta, J. M., (2016) *Estudio a mesoescala de eventos de lluvia localmente intensa para el período poco lluvioso en la mitad occidental de*

- Cuba. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 67 pp.
- Mitrani, I. et al., (2019) *Coastal flood forecast in Cuba, due to hurricanes, using a combination of numerical models*. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 25, No. 2, E-ISSN: 0864-151X, pp. 121-138.
- OMM, (1992) *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Organización Meteorológica Mundial, No. 182, Ginebra, 784 pp.
- Orbe, G., (2009) *Sistema de reconocimiento de patrones de eventos de lluvias intensas en la mitad occidental de Cuba*. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en ciencias meteorológicas, La Habana, 133 pp.
- Peinó, E., (2018) *Lluvias localmente intensas asociadas con tormentas locales severas en las regiones central y oriental de Cuba durante el período lluvioso*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 72 pp.
- Pérez, H. J., (2015) *Configuraciones Sinópticas generadoras de lluvia intensa en el período lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 99 pp.
- Villate, E., (2015) *Lluvia intensa en el oriente cubano para el período poco lluvioso*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, La Habana, 71 pp.

Osniel Armas-Forteza. Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: osniel.armas@insmet.cu

Alis Varela-de la Rosa. Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: alis.varela@insmet.cu

Ailyn Justiz-Águila. Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: ailyn.justiz@insmet.cu

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

Los autores de este trabajo declaran presentar una participación igualitaria en la concepción, ejecución y escritura de la investigación.

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/)