

DISTRIBUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS TORMENTAS EN LA HABANA, ARTEMISA Y MAYABEQUE DURANTE EL PERIODO LLUVIOSO EMPLEANDO EL RADAR

Magela Alvarez Guerrero, Nathalí Valderá Figueredo y Carlos M. González Ramírez

Instituto de Meteorología de Cuba
Loma de Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba
E-mail: magela.alvarez21@gmail.com

RESUMEN

Las tormentas eléctricas resultan muy comunes en Cuba y pueden ocasionar daños económicos significativos sobre todo si presentan tiempo severo. El objetivo de la presente investigación es obtener la distribución espacio-temporal de las tormentas eléctricas que se detectaron durante el periodo lluvioso de los años 2012-2016 en las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque. Para analizar este fenómeno meteorológico con una herramienta que garantice una mejor resolución espacial se empleó el radar meteorológico de Cayo Hueso. Las tormentas fueron identificadas con el producto Estructura de la Tormenta de las observaciones del radar, las variables analizadas fueron el número de días con tormentas para el periodo lluvioso y el número promedio de tormentas para cada mes y por horario. La elaboración de los mapas de distribución se realizó con los softwares Quantum GIS y ArcGIS. En general ambas variables resultaron máximas en las zonas del interior y sur de la región de estudio, mientras que los valores mínimos se localizaron en las regiones costeras, en similitud con las distribuciones espaciales de tormenta de estudios anteriores. Los máximos valores para ambas variables calculadas tienden a coincidir en los municipios San Antonio de los Baños, Nueva Paz y San José de las Lajas. El comportamiento del número de tormentas presentó un carácter local, pero en general para toda la zona los valores máximos se encuentran en agosto y los mínimos en los meses de mayo y octubre. La marcha diaria de esta variable arrojó que el horario de máxima actividad de tormenta es el comprendido entre las 14:00 y las 20:00 hora local, con énfasis de 15:00 a 17:00 hora local.

Palabras claves: tormenta, distribución espacio-temporal, radar meteorológico, número promedio de tormentas, días con tormenta.

ABSTRACT

Thunderstorms are very common in Cuba and they can cause significant economic damages mainly if they present severe weather. The objective of the present investigation is to obtain the spatial and temporary distribution of the thunderstorms detected during the rainy period of the years 2012-2016 in the provinces Havana, Artemisa and Mayabeque. To analyze this meteorological phenomenon with a tool that guarantees a better spatial resolution the meteorological radar of Key West was used. The storms were identified with the Storm Structures radar's product, the analyzed variables were the number of days with storms for the rainy period and the number of storms for every month and per time periods. The elaboration of the distribution maps was carried out with the softwares Quantum GIS and ArcGIS. Generally, both variables were maximum in the areas of the interior and south of the study region, while the minimum values were located in the coastal regions, in similarity with the space distributions of storm of previous studies. The maxima values for both calculated variables spread to coincide in the municipalities San Antonio de los Baños, Nueva Paz and San José de las Lajas. The behavior of the number of storms presented a local character, but generally for the whole area the maximum values are in August and the minima in the months May and October. The daily march of this variable show that the hours of maximum storm activity are the ones between the 14:00 and the 20:00 local time, with emphasis in 15:00 to 17:00 local time.

Keywords: thunderstorms, spatial and temporary distribution, radar, storm's number, day with storm.

INTRODUCCIÓN

Las tormentas convectivas, tormentas eléctricas o simplemente tormentas captan la atención de la comunidad científica debido a su compleja estructura interna, mecanismos de formación y su rápido desarrollo, así como las particularidades de su pronóstico. En el mundo las tormentas resultan más frecuentes en la zona tropical, donde precisamente se encuentra localizada Cuba, de ahí que el archipiélago cubano no esté exento de la afectación de estos fenómenos meteorológicos, sobre todo durante el periodo lluvioso del año, donde se reporta su máxima actividad. De hecho, las descargas eléctricas constituyen la primera causa de muerte por fenómenos naturales en Cuba (Finalé, 2004); tal es así, que el promedio anual de muerte por fulguración entre los años 1987 y 2000 fue de 67 víctimas (Suárez, 2006).

Aunque las tormentas tienen un carácter local pueden ocasionar daños socio-económicos significativos, sobre todo cuando se les asocian fenómenos de tiempo severo tales como: tornados, trombas marinas, vientos lineales fuertes o granizos. Las principales afectaciones se pueden producir en el Sistema Energético Nacional y las telecomunicaciones, pero adquieren una mayor relevancia cuando estas afectan alguna zona de interés económico y político, como resultan las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque, a las cuales se le ha prestado especial atención por la presencia de importantes instalaciones entre otros aspectos. Por lo que los órganos de gobierno provinciales le han solicitado al Centro Meteorológico Territorial de La Habana, Artemisa y Mayabeque la realización de estudios climatológicos de las tormentas, haciendo especial énfasis en las localidades donde es más probable su ocurrencia, además de los horarios donde son más frecuentes, de modo que, se selecciona esta región como zona de estudio.

Tanto en el ámbito internacional como en el nacional se han realizado investigaciones de la distribución espacio-temporal de las tormentas. La mayoría de los estudios sobre esta temática en Cuba se basan en las observaciones de las estaciones meteorológicas de superficie, por lo cual, poseen como principales limitaciones, las referidas a las características intrínsecas a la red de estaciones meteorológicas; pues entre una estación y otra pueden existir áreas en las que ocurre una tormenta y no queda debidamente registrada por ninguna estación. Teniendo en cuenta lo anterior se hace necesario utilizar otra fuente de datos que suplan estas limitantes.

El desarrollo tecnológico alcanzado ha permitido la utilización de herramientas alternativas para la detección de este fenómeno meteorológico, tales como el uso de sensores detectores de actividad eléctrica, satélites y radares meteorológicos. En particular este último ofrece una total cobertura espacial sobre la zona de estudio y una mayor frecuencia de información con respecto a las observaciones meteorológicas, razón por la cual se seleccionó este instrumento como el más idóneo para la realización de esta investigación. Dado lo anterior, se define como objetivo general: Determinar la distribución espacio-temporal de las tormentas en La Habana, Artemisa y Mayabeque a partir del radar de meteorológico durante el periodo lluvioso del año., y como objetivos específicos:

- Obtener la distribución espacial de las tormentas sobre las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque utilizando el radar meteorológico.
- Caracterizar la marcha diaria de las tormentas sobre las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque. ▲
- Comparar la distribución de las tormentas obtenida con las observaciones del radar meteorológico con otras distribuciones realizadas a partir de los reportes de las estaciones meteorológicas.

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica realizada se han desarrollado distribuciones espaciales de las tormentas para todo el planeta, algunas datan desde la década de los 20 del pasado siglo, como por ejemplo la de Pelham (1925). Posteriormente Byers y Braham (1949) dirigieron en Estados Unidos el Proyecto Tormentas del cual resultan mapas del número de reportes de tormentas para cuatro momentos del día en los meses de junio, julio y agosto para un periodo de 20 años (1906-1925). En el siglo XXI Dai (2001a y b) analizó la frecuencia de ocurrencia de días con diferentes tipos de lluvia y de tormentas a partir de los reportes de tiempo presente y pasado de 15 000 estaciones meteorológicas alrededor del mundo y datos sobre los océanos.

Con el empleo de otras herramientas como los sensores Orville *et al.* (2002) estudiaron las descargas eléctricas registradas a partir de la Red Global de Detección de Rayos en Estados Unidos y Canadá durante los años de 1998 al 2000. Años más tarde Virts *et al.* (2013) realizaron una climatología de las descargas eléctricas a partir de la Red Mundial de Localización de Descargas (WWLLN, por sus siglas en inglés). Más

recientemente Albrecht *et al.* (2016), utilizando la climatología brindada por el dispositivo *Lightning Imaging Sensor* (LIS) con resolución de 0.5 grados, calcularon los puntos de mayor incidencia de relámpagos anuales. En esta última distribución se denota que en Cuba las cuatro localidades que mostraron la mayor densidad de relámpagos anuales ocupan a nivel mundial los lugares 33, 39, 40 y 47.

En el archipiélago cubano al igual que en el mundo la distribución espacial de las tormentas se ha realizado utilizando los reportes de las estaciones meteorológicas de superficie tal y como lo demuestran los estudios de Díaz y Pérez (1975), Rego *et al.* (1984), Lecha *et al.* (1994) entre otros. En los últimos años sobresalen los estudios de Álvarez *et al.* (2012) en los cuales se actualiza la distribución espacial de las tormentas eléctricas, aplicando técnicas de interpolación inteligente a la información obtenida de 69 estaciones meteorológicas de superficie en un periodo que abarca desde 1989-2008.

En el caso particular de las tormentas que presentan fenómenos de tiempo severo se han realizado cronologías como la de Alfonso (1994), Aguilar *et al.* (2005) y Bermúdez *et al.* (2014) que realizan una distribución espacial de las tormentas locales severas, en el período 1980-2007, presentándose así mapas de distribución espacial por tipos de severidad y por bimestres.

Para la región de estudio compuesta por las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque se realizó una climatología de las tormentas eléctricas por García y Álvarez (2018), con este se suplen las limitaciones del código de tiempo presente de los estudios de Álvarez *et al.* (2012) con el código de tiempo pasado de las estaciones meteorológicas de superficie.

Por todo lo anterior la novedad del presente estudio radica en la obtención, por primera vez para La Habana, Artemisa y Mayabeque, de una distribución espacio-temporal de las tormentas utilizando los datos del radar meteorológico. La propuesta presentada está relacionada indirectamente con la valoración económica del Servicio Científico-Técnico que brinda el Centro Nacional de Pronósticos del Instituto de Meteorología y del Centro Meteorológico Territorial de Artemisa y Mayabeque. Ello a su vez contribuye de una u otra forma en las actividades socio-económicas del país y en la toma de decisiones por parte de los órganos de gobierno de las provincias mencionadas. Por otro lado, los resultados obtenidos pudieran ser incluidos en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo realizados por la Agencia de Medio Ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta los aspectos tratados con anterioridad, fundamentalmente las características de las tormentas en Cuba y la actualidad de los estudios de su distribución espacial, para la realización de la presente distribución espacio-temporal de estos fenómenos meteorológicos se escogió el periodo lluvioso del año, ya que este coincide con la máxima actividad de tormentas eléctricas en el archipiélago cubano según Lecha *et al.* (1994), Álvarez *et al.* (2012) y García y Álvarez (2018).

Área de estudio

La región de estudio seleccionada está formada por las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque como se muestra en la figura 1. Dicha zona fue escogida porque constituye una región de gran importancia tanto económica como política debido la presencia de importantes instalaciones tales como el Aeropuerto Internacional “ José Martí”, la Zona Especial de Desarrollo Mariel, el Surgidero de Batabanó, la Terminal de Cruceros Sierra Maestra así como los centros de dirección nacional del gobierno y las organizaciones de masas del país. Además de que cuenta con más de tres millones de habitantes y en ella se encuentra la capital de Cuba. En adición, los órganos de gobierno de dichas provincias demandan al Centro Meteorológico Territorial de La Habana, Artemisa y Mayabeque información de las zonas y los horarios en los que ocurren el mayor número de tormentas.



Fig. . Área de estudio

Información utilizada

En el siguiente mapa se observan las estaciones que pertenecen a la región de estudio con sus horizontes sonoros (Fig. 2). Como bien se aprecia, las estaciones se encuentran distantes una de otra y no se cubre toda el área de estudio. En consecuencia, existen zonas en las cuales se puede desarrollar una tormenta y quedar fuera del alcance visual de la estación o la distancia máxima para escuchar un trueno por el observador, lo que provoca que esta no se registre en los reportes de las observaciones. Dado lo anterior, en no pocas ocasiones se dejan de reportar este tipo de fenómenos meteorológicos. Es por ello que, con el presente estudio se pretende suplir esta limitante, con el empleo de una fuente de información que posea una mejor cobertura espacial y temporal, como resulta ser el radar meteorológico.

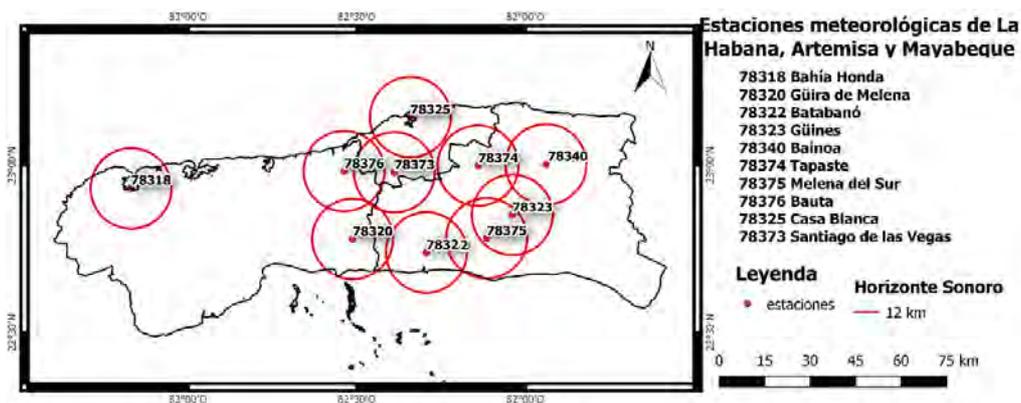


Fig. .Estaciones meteorológicas de superficie de la región de estudio

Ante la problemática anterior se propone como alternativa el uso del radar meteorológico de Cayo Hueso, el cual se encuentra a una distancia adecuada para garantizar la total cobertura de la región de estudio. A pesar de esto, debido a la distancia con respecto al radar más la curvatura de la tierra se presenta una desventaja, a medida que la tormenta se encuentre más distante del radar se pierde información de los radioecos más próximos a la superficie terrestre. Además de los errores de calibración de cualquier radar como instrumento o asociados al ancho del haz, la refracción y al modo de operación del radar. Por ello resulta necesario validar la información que se utilice.

Para la realización de la presente investigación se emplearon las observaciones del radar de Cayo Hueso con una resolución temporal de cinco minutos. La información fue extraída del sitio web del Centro de Datos Climáticos de Estados Unidos (NCDC, 2018) en formato Nexrad Level III, que son productos derivados de las observaciones de los radares meteorológicos de nueva generación de Estados Unidos. Dentro de este conjunto de datos se ofrecen casi 100 tipos de productos, los cuales fueron analizados con el objetivo de seleccionar el que más se adaptara a este estudio.

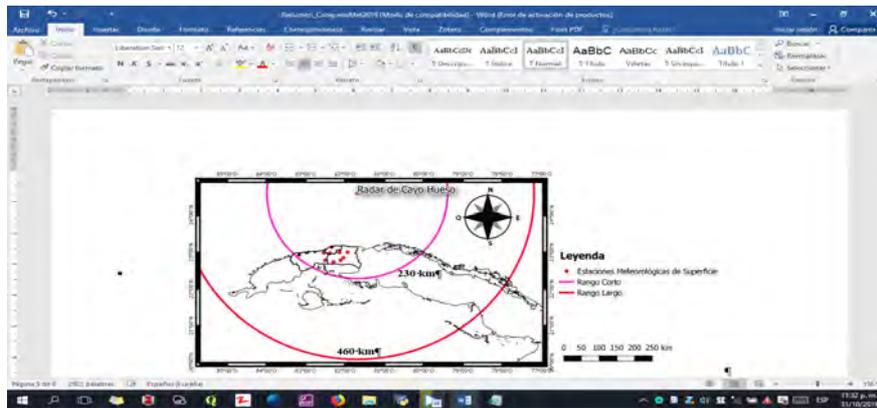


Fig. .Cobertura del radar meteorológico de Cayo Hueso

Se seleccionó el producto Estructura de la Tormenta (SS por sus siglas en inglés), debido a que brinda la localización del centroide de máxima reflectividad de la tormenta en coordenadas cartesianas, el valor de la máxima reflectividad, la altura del tope y de la base, entre otras variables radáricas. En adición está definido para un alcance de 248 millas náuticas equivalentes a 460 kilómetros aproximadamente, lo que representa una ventaja considerable, pues con este rango de alcance del radar se garantiza una cobertura completa de la región de estudio (Fig. 3), a diferencia de otros productos calculados solo para el rango corto de aproximadamente 230 km, el cual no cubre la porción sur occidental de la provincia Artemisa.

Es necesario conocer que este producto es calculado a partir de la salida de los algoritmos Identificación y Seguimiento de las Celdas de Tormenta (SCIT, por sus siglas en inglés) y el Algoritmo de Detección de Granizo (OFCM, 2017). El SCIT define las celdas de tormentas como una región tridimensional con valores de reflectividad significativos (para más información remitirse a Johnson *et al.* (1998)). Cada celda de tormenta identificada por este algoritmo recibe un único Id (identificador), este contiene dos caracteres, una letra (AZ) seguido de un número (09) y se recicla cada 260 tormentas. Por consiguiente, se puede diferenciar una tormenta de otra, además de seguir en el tiempo una misma tormenta.

Entre las limitaciones principales de este algoritmo se encuentra que si las celdas convectivas están muy próximas entre sí, el algoritmo puede combinarlas o falsear divisiones. Además que el cálculo de los atributos de las celdas de tormenta están sujetos a errores producidos por vacíos en el Patrón de Cobertura Volumétrica (VCP, por sus siglas en inglés) usado en la observación. Los VCP son estrategias de escaneo volumétrico automático que están enlazados al modo operacional del radar para optimizar la generación de productos dados para una situación meteorológica específica (OFCM, 2016). Los patrones que favorecen al producto SS son los del grupo de convección profunda. Este último brinda más ángulos de elevación bajos, por tanto ofrece una mayor resolución vertical, el primero resulta menos efectivo para la detección de los rasgos de las tormentas a una distancia más larga. Por lo que, la calidad del producto depende del modo de operacional que tenga el radar en el momento de la observación.

La principal limitación del uso de este producto radica en que solo brinda la ubicación del centro de máxima reflectividad de la celda y no toma en cuenta el área que ocupa la misma. En consecuencia, una tormenta puede no quedar registrada en una región porque su ecocentroide de máxima reflectividad no se ubique sobre esta, aunque su área influya en dicha región. Esto se puede ilustrar en la figura 5, en ella se observa un ejemplo correspondiente al día 20 de julio de 2013, como es posible apreciar en la región se observan extensas áreas de radioecos con altos valores de reflectividad. Sin embargo con el producto SS solo quedan registrados algunos puntos de afectación sobre la región de estudio, además el eco-centroide puede encontrarse en el mar y aún así influir sobre la región.

De ahí que los resultados obtenidos en la presente investigación deben ser interpretados teniendo en cuenta lo anteriormente dicho. No obstante, empleando el producto SS se cuenta con información en áreas para las cuales no se tenía por la ausencia de estaciones meteorológicas, lo que representa una ventaja superior si se compara con otros estudios sobre esta temática.

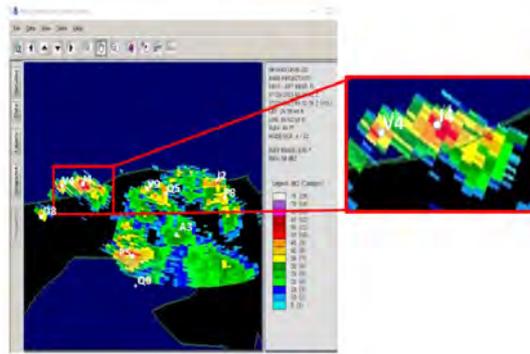


Fig.. Visualización del producto SS superpuesto con el producto Base Reflectivity

Procesamiento de la información primaria

Para procesar los datos se empleó el software Weather and Climate Toolkit (WCT) que permite la visualización y la exportación de datos de radar. Este es un software libre distribuido por National Center for Environmental Information de la NOAA.

Teniendo en cuenta las desventajas de la utilización del radar de Cayo Hueso y la selección del SS se decidió realizar una validación a los datos primarios. Para ello se escogieron al azar 20 casos de reportes de tormentas ocurridas durante los cinco años del periodo en estudio (Tabla 1). Las características de cada uno de ellos fueron extraídos de los Resúmenes Sinópticos Mensuales disponibles en la página web <http://www.insmet.cu> (INSMET, 2018).

Tabla . Casos de estudios seleccionados.

No.	Año	Mes	Día	Hora Local	Municipio	Descripción
1	2012	6	2	18:45	Santa Cruz del Norte	Tormenta con lluvia intensa
2	2012	6	29	14:52	Boyeros	Tormenta Local Severa con viento fuerte 97 km/h
3	2012	7	4	16:00	Madruga	Tormenta Local Severa con granizo
4	2012	7	12	14:00	Guira de Melena	Tormenta Local Severa con viento fuerte 92 km/h
5	2012	7	17	14:40	Arroyo Naranjo	Tormenta Local Severa con granizo y viento fuerte 86 km/h
6	2012	8	11	13:31	Arroyo Naranjo	Tormenta Local Severa con granizo y lluvia Intensa
7	2012	9	14	13:29-13:50	Batabanó	Tormenta Local Severa con tornado
8	2014	6	20	15:00-15:30	Güira de Melena	Tormenta Local Severa con granizo
9	2014	6	27	17:00-18:00	Artemisa	Tormenta Local Severa con granizo y viento fuerte
10	2014	6	29	15:45-16:45	Quivicán	Tormenta Local Severa con granizo
11	2014	6	29	17:15	Güines	Tormenta
12	2014	7	1	15:42	Candelaria	Tormenta
13	2014	8	22	15:00-16:40	Güira de Melena	Tormenta Local Severa con granizo
14	2014	10	3	16:15	Caimito	Tormenta Local Severa con granizo
15	2015	5	21	16:30	Güines	Tormenta Local Severa con granizo
16	2015	6	11	16:00	La Lisa	Tormenta Local Severa con granizo
17	2015	6	26	16:00	Jaruco	Tormenta Local Severa con granizo
18	2015	7	13	16:30	Arroyo Naranjo	Tormenta Local Severa con granizo
19	2015	9	21	16:00-17:00	Artemisa	Tormenta Local Severa con granizo
20	2016	7	3	15:10	Mariel	Tormenta Local Severa

Luego, las ubicaciones de las principales celdas convectivas y el valor de la reflectividad máxima detectadas por el radar de Cayo Hueso y reflejadas por el producto SS, se compararon con aquellas identificadas por el radar de Casa Blanca. La frecuencia de las observaciones del radar meteorológico de Casa Blanca en la mayoría de los casos fue de 15 minutos, las cuales fueron visualizadas empleando el software Vesta|Proceso.

Debido a que ni los horarios ni la frecuencia de observación de ambos radares coinciden en todos los casos, se relacionaron los horarios que más se aproximaran. En consecuencia, el horario de las observaciones de ambos radares tuvo una diferencia de un minuto en nueve casos, en siete de dos minutos y para el resto coincidieron. Se encontró que las variaciones entre las posiciones geográficas resultaron muy pequeñas, con coeficientes de correlación para la latitud igual a 0.86 y para la longitud de 0.72. En cuanto a la reflectividad, dicho coeficiente alcanzó un valor igual a 0.54 y la diferencia media de esta variable hallada por ambos métodos fue de ± 2.65 dBZ, con valor de ± 1 dBZ en el 40% de los casos (Tabla. 2).

Tabla . Análisis de los casos de estudio (Horario de las observaciones y valor de la reflectividad)

No.	Obs. Casa Blanca (UTC)	Obs. Cayo Hueso (UTC)	Rad. Casa Blanca Z(dBZ)	Rad. Cayo Hueso Z(dBZ)	Posiciones
1	20:45	20:46	54	57	Coinciden geográficamente
2	18.45	18.44	59	59	Coinciden geográficamente
3	20:00	20:00	59	59	Coinciden geográficamente
4	18.00	18.00	51	52	Coinciden geográficamente
5	18.45	18.46	59	60	Coinciden geográficamente
6	17.31	17.33	56	58	Coinciden geográficamente
7	17.30	17.32	54	54	Coinciden geográficamente
8	19.30	19.31	64	60	Coinciden geográficamente
9	21.00	21.02	64	63	Coinciden geográficamente
10	19.45	19.43	65	59	Coinciden geográficamente
11	21.15	21.15	58	54	Coinciden geográficamente
12	19.46	19.44	59	60	Coinciden geográficamente
13	19.45	19.44	58	58	Coinciden geográficamente
14	19.45	19.44	63	56	Coinciden geográficamente
15	20.15	20.14	57	60	Coinciden geográficamente
16	20.15	20.23	69	60	Coinciden geográficamente
17	20.00	19.59	55	60	Coinciden geográficamente
18	21.45	21.47	32	53	Coinciden geográficamente
19	20.00	20.02	61	64	Coinciden geográficamente
20	23.10	19.10	59	61	Coinciden geográficamente

Por lo anteriormente expresado, con la comprobación del producto SS se asumió la información como confiable para la realización del estudio. Posteriormente se realizó el procesamiento por lotes a los datos del SS. Primero se exportaron a *.csv (valores separados por coma) con el WCT y luego se reorganizaron de manera tal que solo quedarán el identificador de la tormenta (Id), la latitud y longitud y el valor de la máxima reflectividad de cada celda de tormenta, además del día, mes, año, hora, minutos y segundos en que fueron identificadas las celdas, con el objetivo de optimizar el tratamiento ulterior.

Determinación de la distribución espacio-temporal de las tormentas

La realización de las distribuciones espacio-temporales de las tormentas se hizo utilizando Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) tales como el Quantum GIS en su versión 2.18 y el ArcGIS. Las bondades del QGIS, permitieron realizar un conteo del número de tormentas por puntos de rejillas en un dominio definido entre los 83.5-81.5° W y los 22.4-23.4° N (Fig.5), el cual permite analizar tanto las tormentas sobre el mar y los límites este y oeste de la región. Se consideraron aquellas tormentas cuya reflectividad máxima alcanzada fue superior a los 35 dBZ, asumiendo así uno de los criterios de Puentes *et al.* (2015) para la identificación de tormentas en Cuba empleando el radar meteorológico. Recalcar que en cada rejilla solo se tomó como posición de la tormenta cuando esta alcanzó su máximo valor de reflectividad, por lo que fueron descartadas las otras posiciones para evitar contar una misma tormenta dos o más veces en una misma rejilla, para ello se elaboró un programa en lenguaje de programación Python.

Por medio del cual también se guardó la posición cuando cada celda de tormenta alcanzó su máxima reflectividad, para determinar así la cantidad de tormentas que fueron analizadas.

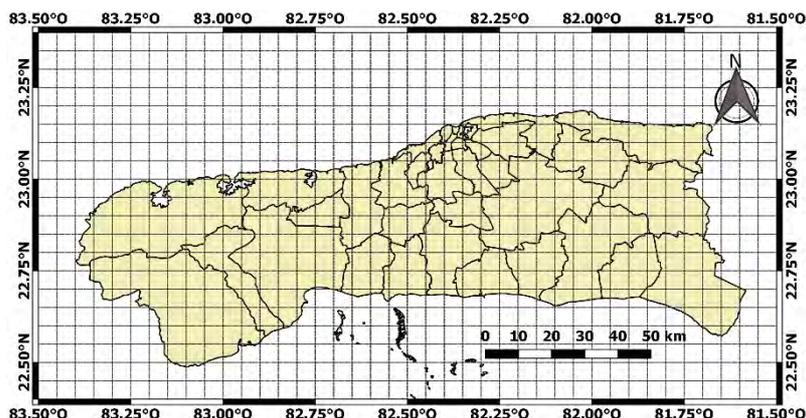


Fig. .Puntos de rejillas sobre la región de estudio

La variable estudiada fue el número promedio de tormentas para cada mes del periodo lluvioso del año y para la totalidad del mismo, la cual se calculó además por intervalos de tiempo para caracterizar su marcha diaria, haciendo especial énfasis en el periodo de máxima actividad de las tormentas. La distribución espacio-temporal de esta variable se realizó por puntos de rejilla separados entre sí a 0.05 grados (líneas discontinuas grises de la figura 5, paso lo suficientemente pequeño como para recoger el comportamiento de este fenómeno a escala local.

Los intervalos de horas del día seleccionados fueron cinco (Tabla 3), divididos de manera que coincidieran con las observaciones sinópticas, pero a su vez con las características propias de la marcha diaria de las tormentas en Cuba. Para ello se agruparon los horarios de la mañana con las primeras horas de la tarde y los de la noche con la madrugada, por reportarse con menor frecuencia este fenómeno meteorológico en las observaciones correspondientes a estas horas. También fue realizado un análisis del total de tormentas por cada hora al horario comprendido entre las 13:00 y las 19:00 hora local, por ser este en el que se reporta la mayor ocurrencia de tormentas (Lecha *et al.*, 1994; Álvarez, 2006; García & Álvarez, 2018), con el objetivo de calcular la hora en que ocurrieron más tormentas en el periodo seleccionado.

Tabla 3. Periodos seleccionados

No	Hora(UTC)	Hora Local
1	12:00-17:59	07:00-12:59
2	18:00-20:59	13:00-15:59
3	21:00-23:59	16:00-18:59
4	00:00-02:59	19:00-21:59
5	03:00-11:59	22:00-06:59

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las consideraciones explicadas en el capítulo anterior. Para la realización de la distribución espacio-temporal de las tormentas en el periodo lluvioso del año se contó con observaciones de radar el 94.78% de los días del periodo seleccionado. Luego del procesamiento primario, resultaron 221 273 productos SS para ser analizados, seguidamente en la tabla 4 se muestran la cantidad de productos obtenidos para cada mes durante los años 2012-2013.

Tabla 4. Cantidad de productos SS analizados y número de tormentas detectadas

Mayo	Junio	Julio	Agost	Septiembr	Octubr	Total
------	-------	-------	-------	-----------	--------	-------

				o	e	e	
Productos	29277	33225	34212	42053	42783	39723	221273

Distribución espacio-temporal del número promedio de tormentas

Para la realización de la distribución fueron analizadas un total de 38 608 tormentas para el dominio seleccionado. En la figura 6 se muestran la cantidad de tormentas por meses de los años 2012-2016, de ella se deriva que los meses en los cuales se detecta el menor número de tormentas son los meses de inicio y final del periodo lluvioso del año, en cambio la ocurrencia de este fenómeno meteorológico resulta más acentuada en los meses de junio a septiembre, con el máximo absoluto en el mes de agosto. Dado lo anterior, se realizó la distribución espacio-temporal del número promedio de tormentas para cada mes del periodo lluvioso del año y para este periodo en su totalidad.

Fig. .Número total de tormentas detectadas para el periodo 2012-2016 en el dominio de estudio

Número promedio de tormentas para el periodo lluvioso del año

En la figura 7 se observa que la distribución del número de tormentas va definiendo una zona de máximos valores hacia el interior de la región de estudio, más próxima al sur en la provincia de Mayabeque. La distribución de los máximos evidencia que la convección tiene lugar en las zonas del interior fundamentalmente. Esta situación se corresponde con la influencia del anticiclón subtropical del Atlántico Norte sobre Cuba y mares adyacentes en los meses de mayo a octubre, imponiendo un régimen de vientos débiles con brisas en la tarde. Ello unido a la inestabilidad vespertina producto del calentamiento del día, al suficiente contenido de humedad en la baja troposfera y a factores locales, favorece una mayor ocurrencia de las tormentas hacia localidades del interior y sur, lo que coincide con lo planteado por Lecha *et al.* (1994), Carnesoltas (2002) y Benedico *et al.* (2005) acerca del comportamiento de las tormentas.

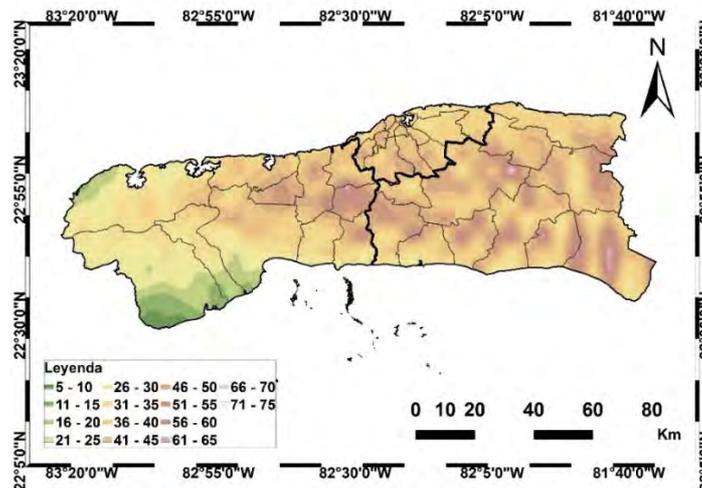


Fig. . Número de tormentas promedio para el periodo lluvioso del año

El valor máximo absoluto de la región fue detectado en el municipio de San José de las Lajas, perteneciente a la provincia de Mayabeque, con un promedio de 75 tormentas. Con respecto a la provincia de La Habana los mayores valores se ubican entre los municipios Arroyo Naranjo y Boyeros. Los valores máximos para la provincia Artemisa se localizan en las fronteras del municipio San Antonio de los Baños con los municipios Mariel y Bauta.

La orientación de la línea de confluencia del flujo a mesoescala juega un papel fundamental en la localización de los mínimos en la porción suroeste de la provincia de Artemisa. No obstante, al ser la región más distante del radar, el menor ángulo de elevación de la antena llega con una altura superior a los 5 km y la altura del núcleo de máxima reflectividad en tormentas que generan tiempo severo alcanza entre 15 km (Hernández, 2015). De ahí que se pierda información importante de las celdas, sobre todo si estas tienen asociada lluvia intensa, caracterizada por un eco-centroide de máxima reflectividad más bajo.

Número promedio de tormentas mensual

Con el análisis de los mapas de distribución espacial del número promedio de tormentas para cada mes se pudo constatar que la ubicación de las zonas con valores máximos y mínimos varía según el mes. Como era de esperarse, en general para toda la región de estudio, los meses con menores valores detectados fueron mayo y octubre, principalmente octubre. Por esta razón se hará especial énfasis en octubre, al igual que en agosto, mes en el que la máxima actividad de las tormentas abarca un área mayor respecto a los de junio, julio y septiembre.

Agosto climatológicamente se caracteriza por la persistencia de la influencia de la cuña anticiclónica del anticiclón subtropical del Atlántico Norte en el archipiélago cubano además de la presencia en la atmósfera superior de la Vaguada Tropical Troposférica Superior en la cual nacen Bajas Frías (Fernández y Díaz, 2005). Todo esto unido al paso de ondas tropicales por el mar Caribe propicia condiciones sinópticas para el desarrollo de actividad convectiva. En adición esta puede incentivarse también debido a factores locales y el calentamiento del día ya que este mes es uno de los meses más cálidos del año. Por su parte octubre es un mes de transición en el cual se denotan características típicas tanto del periodo lluvioso como del poco lluvioso. En él suelen desarrollarse procesos atmosféricos que van desde la génesis de organismos tropicales hasta los relacionados con la presencia de frentes casi-estacionarios próximos a la costa norte de Cuba

En la figura 8 puede apreciarse el comportamiento del número de tormentas que como promedio en los años del 2012 al 2016 ocurrieron en los meses de agosto y octubre. De su análisis puede derivarse que:

- En agosto algunas zonas alcanzaron un valor promedio de hasta 16 tormentas en las áreas de los municipios de Nueva Paz y San Nicolás, ambos en la provincia de Mayabeque mientras que para Artemisa el valor máximo de hasta 14 tormentas se registra en el municipio de San Antonio de los Baños. Para La Habana, los mayores valores fueron de hasta 10 tormentas como promedio para el municipio de Marianao, en el límite de Arroyo Naranjo y San Miguel del Padrón y en el extremo sur de Habana del Este (Fig. 8).
- En octubre, en algunas localidades el interior y sur de la región, los valores promedios estuvieron entre 4 y 8 tormentas mientras hacia la costa norte se alcanzan valores ligeramente superiores en el municipio de Santa Cruz del Norte en la provincia de Mayabeque (Fig. 8), situación que coincide con el tránsito de zonas frontales por el estrecho de la Florida.

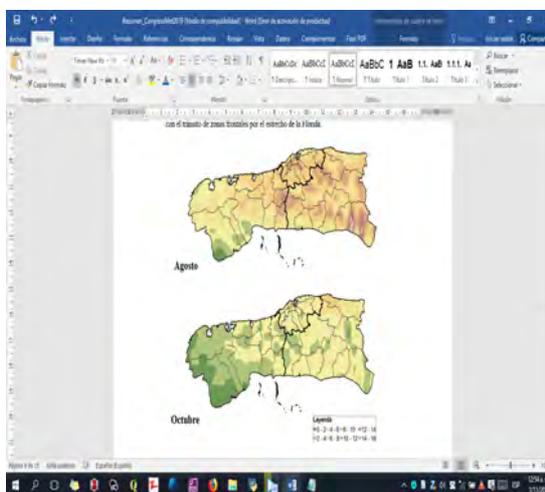


Fig. 8. Distribución espacial del número de tormentas promedio para los meses de agosto y octubre

Marcha diaria del número promedio de tormentas

Se pudo analizar la marcha diaria de las tormentas a partir de 35 mapas del número promedio de tormentas por grupos de horas para todo el periodo lluvioso y para cada uno de los meses que lo componen.

Marcha diaria para el periodo lluvioso del año

En la figura 9 se observa que la distribución del número promedio de tormentas para el periodo lluvioso del año durante los años 2012-2013 muestra su mínimo en los horarios de la noche a la mañana, en estos horarios las tormentas resultan más comunes en las zonas costeras, nótese que el extremo sur occidental de la provincia Artemisa el máximo precisamente se encuentra entre las 22:00 y 06:59 horas. Por otro lado, se

puede afirmar que en general para toda la región la máxima actividad de las tormentas ocurre entre las 13:00 y las 19:00 hora local, aunque para cada lugar en específico los horarios de los máximos varían según el mes.

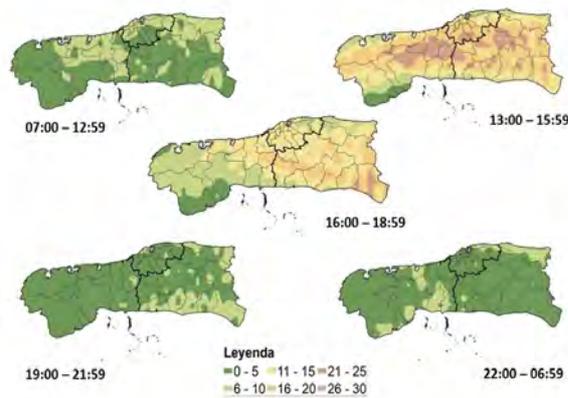


Fig. 9. Marcha diaria del número promedio de tormentas para el periodo lluvioso

El análisis realizado para las horas de máxima actividad a partir del total de tormentas que se detectaron en el periodo lluvioso de los años 2012-2016 evidencia que la actividad convectiva en las primeras horas de la tarde abarca la mayor parte de la región y los máximos con el transcurso del tiempo se ubican más al este (Fig. 10). Los resultados arrojados muestran que las horas en las que se identificaron el mayor número para toda la región en general fueron las comprendidas entre las 14:00 y 15:59 hora local.

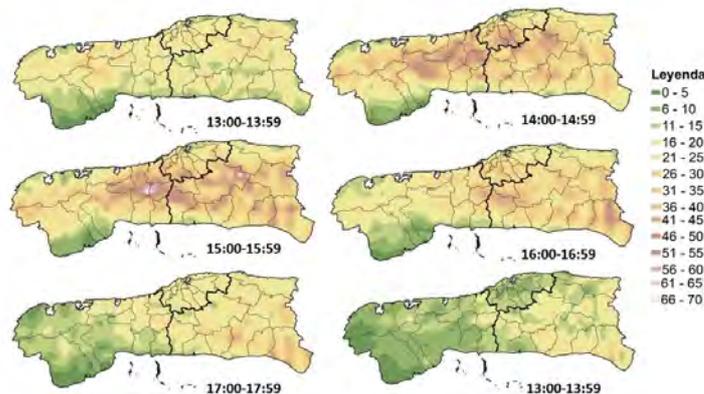


Fig.10. Número total de tormentas detectadas para el periodo lluvioso de los años 2012-2016

Como se aprecia en la figura 10 el mayor número de tormentas que fueron detectadas para la región fue de 70 tormentas para el periodo lluvioso de los años 2012-2016, este valor se alcanzó en la hora comprendida entre las 15:00 y las 16:00 en la zona limitante entre los municipios San Antonio de los Baños y Mariel en la provincia Artemisa y aunque en menor área al este del municipio de San José de la provincia Mayabeque. Para la provincia de La Habana se observa que el máximo número de tormentas se encontró en el horario entre las 14:00 y las 15:00 horas, con un valor de hasta 60 tormentas localizado en el límite entre los municipios Boyeros y Arroyo Naranjo.

Marcha diaria para cada mes del periodo lluvioso

Siguiendo el razonamiento anterior, se obtiene que para todos los meses la distribución temporal del número de tormentas es similar a la del periodo, los horarios de máximos y mínimos resultan ser los mismos. Como se puede apreciar en un ejemplo de los horarios de mínima actividad el número de tormentas no supera las cuatro tormentas como promedio al mes y ellas en el mes de agosto se localizan con una mayor frecuencia hacia zonas de la costa sur mientras que en el mes de octubre hacia la costa norte (Fig. 11).

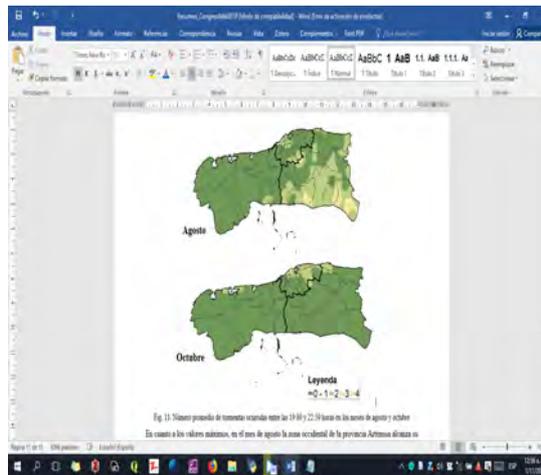


Fig. 11. Número promedio de tormentas ocurridas entre las 19:00 y 22:59 horas en los meses de agosto y octubre

En cuanto a los valores máximos, en el mes de agosto la zona occidental de la provincia Artemisa alcanza su máximo en el horario comprendido entre las 13:00 y las 15:59 hora local mientras que de 16:00 a 18:59 horas se registraron valores inferiores (Fig. 12). En contraposición en el resto de la zona de estudio en ambos horarios se registraron valores similares, aunque resalta el municipio de Nueva Paz, de la provincia Mayabeque, el cual en el horario de 16:00 a 18:59 horas casi duplica el número de tormentas promedio del horario anterior. Por otro lado, en el municipio de San José de la misma provincia en el primero de estos horarios los máximos se ubican al norte del municipio, mientras que en el horario siguiente estos se localizan más hacia el interior. El máximo absoluto para el mes de agosto en el horario comprendido entre las 13:00 y las 15:59 horas se detectó en el municipio de Jaruco de la provincia de Mayabeque.

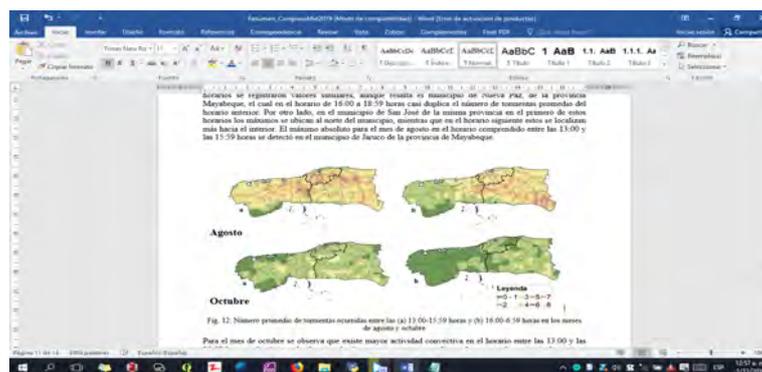


Fig. 12. Número promedio de tormentas ocurridas entre las (a) 13:00-15:59 horas y (b) 16:00-18:59 horas en los meses de agosto y octubre

Para el mes de octubre se observa que existe mayor actividad convectiva en el horario entre las 13:00 y las 15:59 horas y el máximo absoluto igual a 4 tormentas como promedio se alcanza en el municipio Artemisa a diferencia en el horario siguiente que este valor se encuentra en Nueva Paz de la provincia de Mayabeque (Fig. 12). Comparación de los resultados alcanzados con distribuciones obtenidas por otras investigaciones

Distribución espacial del número de días con tormentas

El mapa de distribución espacial del número de días con tormenta promedio para el periodo lluvioso del año (Fig. 13) guarda relación con el del número promedio de tormentas. Del análisis del mismo se corrobora que la mayor cantidad de días se encuentra en las zonas del interior y sur. Los mínimos se localizan fundamentalmente en las costas occidentales de la provincia Artemisa. Los núcleos de mayor cantidad de días con tormentas se encuentran sobre el municipio San Antonio de los Baños perteneciente a la provincia Artemisa, al este del municipio San José, en la zona central de los municipios Güines, San Nicolás y Nueva Paz, en este último se detectaron hasta 80 días con tormenta y por último un pequeño núcleo en el centro-este de Madruga. Para la provincia de La Habana se observa un gradiente de aumento de los valores desde las costas hacia el interior.

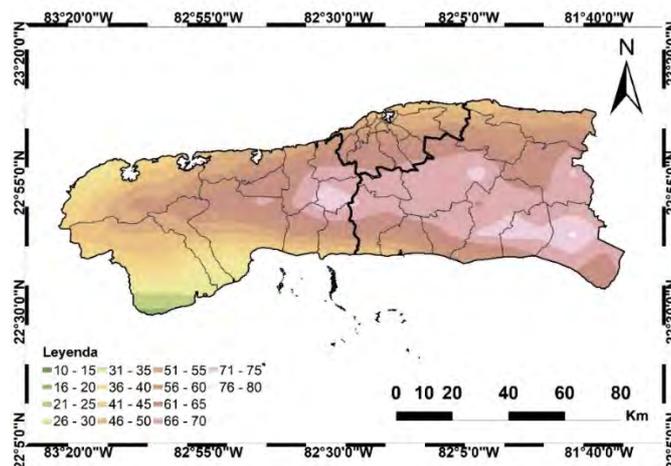


Fig. 13. Número de días con tormenta promedio para el periodo lluvioso

Al comparar con la distribución obtenida por Rego (1988) para el periodo lluvioso del año se encuentra una correlación entre los núcleos de mayor cantidad de días con tormenta, los cuales se ubican en la zona interior y central de la región. También es posible encontrar similitudes entre este resultado y los propuestos por Álvarez & Borrajero (2016) en cuanto a las posiciones de los núcleos de mayor cantidad de días los cuales se observan en la provincia de Mayabeque en los municipios de San José y Nueva Paz.

Resaltar que en el proceso de comparación no se enfatizó en el valor numérico, el cual no debe compararse porque, como se ha recalcado anteriormente, este método contabiliza la posición del centroide de máxima reflectividad de la tormenta y esta cubre un área específica, por lo que para una rejilla puede haber influido una tormenta cuyo centroide se localizara en una rejilla vecina y no quedar contado ese día para esa rejilla.

Comparación con otras distribuciones

La distribución espacial de la variable número promedio de tormentas para el periodo lluvioso del año mostró semejanza al comportamiento de la frecuencia de ocurrencia de observaciones con tormenta de Álvarez (2006). Al comparar ambas variables (Fig. 14 y Fig.15) se observa que coinciden espacialmente la mayor frecuencia con la posición de los máximos número de tormentas, localizados desde la porción sur de la provincia de Mayabeque extendiéndose al norte y al centro de la región, mientras que al suroeste de la provincia Artemisa se encuentran los mínimos de la región para ambas distribuciones.

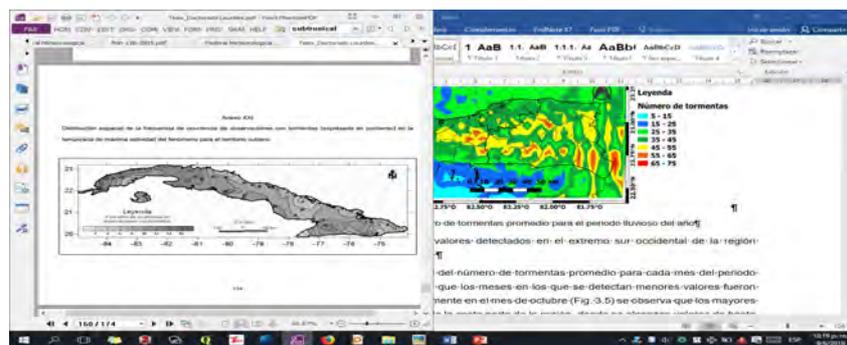


Fig. 14. Distribución espacial de la frecuencia de ocurrencia de observaciones con tormentas para el periodo de máxima actividad según Álvarez (2006)

Se encontró correspondencia con lo planteado por Álvarez (2006) y Martínez (2015) en cuanto a que agosto es el mes en que se alcanza el máximo de ocurrencia para la región de estudio. Otro aspecto a resaltar es que para García & Álvarez (2018), en la mayoría de las estaciones de la región de estudio, el mes más favorecido es julio. Si se analiza el mapa de este mes se puede observar que el número de máximos abarca una pequeña área al compararla con el de agosto donde se alcanzan valores más altos para una mayor área; en adición, si se compara con junio sucede lo mismo (Fig. 15). En el mes de junio climatológicamente se registra una menor ocurrencia de tormentas, aunque para Martínez (2015) para los periodos lluviosos de los años 2013-2014 en este mes se alcanzó el máximo secundario.

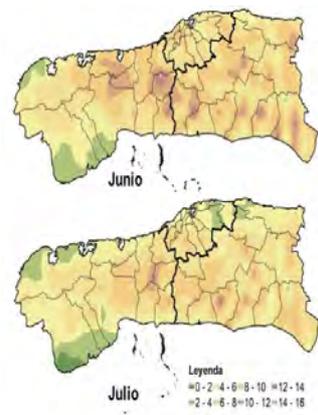


Fig.15. Número promedio de tormentas para los meses de junio, julio y septiembre en los años 2012-2016

Del análisis de los Resúmenes Sinópticos Mensuales se refleja que en el periodo 2012-2016 mayormente el mes de julio se comportó menos cálido y lluvioso de lo normal, a diferencia de junio que mostró que las precipitaciones estuvieron por encima de lo normal para los años de estudio (INSMET, 2018). Las precipitaciones son el reflejo de las tormentas y este comportamiento está asociado a los patrones sinópticos de estos meses para el periodo estudiado.

CONCLUSIONES

Los resultados alcanzados en este estudio satisfacen los objetivos trazados y demostraron que la confección de una distribución espacio-temporal de las tormentas a partir del radar meteorológico es factible.

1. La distribución espacio-temporal de las tormentas obtenida con el radar meteorológico para el periodo lluvioso de los años 2012-2016, permitió un análisis con una mayor resolución en comparación con las confeccionadas a partir de los datos de las estaciones meteorológicas. De ella se deriva que los máximos se alcanzan en el mes de agosto y hacia localidades del interior y sur de La Habana, Artemisa y Mayabeque, principalmente en los municipios de Boyeros, San Antonio de los Baños y San José de las Lajas.
2. La marcha diaria de las tormentas para el periodo analizado arrojó que el horario de mayor actividad es el comprendido entre las 13:00 y 19:00 horas, alcanzando su máximo entre las 14:00 y 16:00 horas.
3. La comparación de la distribución espacio-temporal de las tormentas obtenida con aquellas confeccionadas a partir de las estaciones meteorológicas de superficie, refleja una gran similitud en las posiciones de los valores máximos y mínimos. Sin embargo, se encontraron diferencias en el mes de máxima ocurrencia con respecto a lo planteado en el estudio de García & Álvarez (2018), lo que se corresponde con los patrones sinópticos imperantes en el periodo analizado.

RECOMENDACIONES

- Realizar una distribución espacio-temporal de las tormentas utilizando el radar meteorológico para el periodo poco lluvioso del año.
- Considerar el área de la tormenta en las futuras distribuciones espacio-temporales de las tormentas confeccionadas a partir del radar meteorológico.
- Realizar una distribución espacio-temporal de las tormentas para toda Cuba utilizando la red de los radares meteorológicos cubanos.
- Confeccionar una climatología de las tormentas empleando el radar meteorológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR, G.G., CARNESOLTA, M., FERNÁNDEZ, C. *et al.* (2005): Climatología de las Tormentas Locales Severas en Cuba en el período 1987-2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio. *Revista Cubana de Meteorología*. 12 (11): 13-10.
2. ALBRECHT, R.I., GOODMAN, S.J., BUECHLER, D.E. *et al.* (2016): Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. 97 (11): 2051-2068.
3. ALFONSO, A.P. (1994): *Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología*. Editorial Academia, La Habana, Cuba, 168 p.
4. ÁLVAREZ, L. (2006): *Estudio de la localización espacial de las tormentas eléctricas en Cuba y su tendencia*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas. La Habana, Cuba, 168 p.
5. ÁLVAREZ, L. & BORRAJERO, I. (2018): Distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba clasificados a partir del tiempo presente II. *Revista Cubana de Meteorología*. 24 (1): 111-127.
6. ÁLVAREZ, L., BORRAJERO, I., ÁLVAREZ, R. *et al.* (2012): Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*. 18 (11): 83-99.
7. BENEDICO, O.A., CARNESOLTAS, M. & AGUILAR, G.G. (2005): Línea de confluencia del flujo a mesoescala: Situaciones a escala sinóptica favorables para su ocurrencia y su relación con las precipitaciones convectivas sobre Ciego de Ávila. *Revista Cubana de Meteorología*. 2 (2): 43-50.
8. BERMÚDEZ, Y., AGUILAR, G. & WALLO, A. (2014): Distribución espacial de las tormentas locales severas en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*. 20 (21): 59-72.
9. BYERS, H.R. & BRAHAM, R.R. (1949): *The Thunderstorm* Washington D. C., Estados Unidos, 287p.
10. CARNESOLTAS, M. (2002): La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales. *Revista Cubana de Meteorología*. 9(1): 39-60.

11. DAI, A. (2001a): Global Precipitation and Thunderstorm Frequencies. Part I: Seasonal and Interannual Variations. *Journal of Climate*. 14 (16): 1112-1128.
12. DAI, A. (2001b): Global Precipitation and Thunderstorm Frequencies. Part II: Diurnal Variations. *Journal of Climate*. 14 (16): 1925-1940.
13. DÍAZ, X. & PÉREZ, D.O. (1975): *Distribución del número de días con tormentas en Cuba*. 9 p.
14. FERNÁNDEZ, A.D.J. & DÍAZ, Y.A. (2005): *Catálogo de Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el periodo 1979- 993*. Cienfuegos, Cuba, 167 p.
15. FINALÉ, A. (2004): *La fulguración en Cuba y sus particularidades en la provincia de Las Tunas*. Memorias de la Convección Trópico 2004. Primer Taller de Meteorología Tropical, La Habana, Cuba.
16. GARCÍA, Y. & ÁLVAREZ, L. (2018): Climatología de las tormentas eléctricas determinadas a partir del código de estado de tiempo pasado. *Revista Cubana de Meteorología*. 24 (22): 201-215.
17. HERNÁNDEZ, J.F. (2015): *Estructura interna de las tormentas que generan tiempo severo a través de las imágenes del radar de Casa Blanca*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas InSTEC. 82p.
18. INSMET (2018): *Instituto de Meteorología* [Online]. Disponible en: <http://www.insmet.cu> [Consultado el 2 de abril de 2018].
19. LECHA, L.B., PAZ, L.R. & LAPINEL, B. (1994): *El clima de Cuba*. Editorial Academia, La Habana, Cuba, 186p.
20. MARTÍNEZ, Y. (2015): *Movimiento de tormentas eléctricas en el período lluvioso en La Habana, Artemisa y Mayabeque*. Tesis en opción al título de Licenciado en Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas InSTEC. 58p.
21. NCDC (2018): *National Climatic Data Center* [Online]. Disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov> [Consultado el 12 de marzo de 2018].
22. OFCM (2016): *Federal Meteorological Handbook No. 11 WSR-88D Meteorological Observations Part A*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. Departamento de Comercio de Estados Unidos, Silver Spring.
23. OFCM (2017): *Federal Meteorological Handbook No. 11 WSR-88D Meteorological Observations Part C*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. Departamento de Comercio de Estados Unidos, Silver Spring.
24. ORVILLE, R.E., HUFFINES, G.R., BURROWS, W.R. *et al.* (2002): The North American lightning detection network (NALDN)-First results: 1998-2000. *Monthly Weather Review*. 130 (138): 2098-2109.
25. PELHAM, C.E. (1925): The distribution of Thunderstorms over the Globe. *Geophysical Memoirs*. Majesty's Stationery Office, Londres, 3(24): 146-166.
26. PUENTES, O., NOVO, S. & MARTÍNEZ, D. (2015): Estudio de la tormenta convectiva por radar en este y centro-oeste de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*. 21(21): 76-90.
27. REGO, J.S. (1988): *Atlas climático de Cuba*. Editorial ICGC, La Habana, Cuba.
28. REGO, J.S., OSORIO, M. & CARRIÓN, A.M. (1984): *Las tormentas en Cuba*. Editorial UDICT, Instituto de Meteorología, 5 p.
29. SUÁREZ, O.S. (2006): Descargas atmosféricas y sus efectos en la población cubana. *Ingeniería Energética*. 75(1): 34-39. La Habana, Cuba.
30. VIRTS, K.S., WALLACE, J.M. & HUTCHINS, M.L. (2013): Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 94 (99): 1381-1391