



Ingeniería

ISSN: 0121-750X

ISSN: 2344-8393

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Ardila Murillo, Brandon; Soto Ríos, Edison; Argüello Barbosa, Didier;
Tello Rodríguez, Heribert; López Trujillo, Jesús; Montanyà, Joan
Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas
por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano

Ingeniería, vol. 27, núm. 2, e202, 2022, Mayo-Agosto
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.17925>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498872430006>

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

redalyc.org
UAEM

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Charge Structure Analysis of Two Thunderstorms Recorded by the Lightning Mapping Array Network in the Colombian Magdalena Medio

Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano

Brandon Ardila Murillo^{*}¹, Edison Soto Ríos^{ID}¹, Didier Argüello

Barbosa^{ID}¹, Heribert Tello Rodríguez^{ID}¹, Jesús López Trujillo^{ID}²,

Joan Montanyà^{ID}²

¹Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, Universidad Industrial de Santander

(Bucaramanga, Colombia), ²Lightning Research Group LRG, Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España). Correspondence: E-mail: brandon2208141@correo.uis.edu.co - easotor@uis.edu.co

Recibido: 27/04/2021. Modificado: 06/07/2021. Aceptado: 04/10/2021.

Abstract

Context: From the location of the Lightning Mapping Array (LMA) network at the borders of the municipalities of Barrancabermeja and Yondó in 2018, uninterrupted data of IC and CG flashes that occurred over this study area were taken. So far, no electrical storms have been characterized in tropical areas such as Magdalena Medio through high-resolution lightning mapping networks. Therefore, in this work, the charge structure of two thunderstorms registered by the LMA network on November 23 and 27, 2018, is determined.

Method: Based on inspection methods, the bidirectional leader theory, the propagation differences of positive and negative leaders, and a data visualization algorithm, the heights of the recorded thunderstorms' charged regions were defined. Likewise, using information from the LINET network, possible CG flashes that occurred during the studied time windows were determined along with their corresponding currents and polarities.

Results: Both thunderstorms had a tripolar structure; in the November 23 storm, the height of the lower positive charge region was located between 5 and 7,5 km, the negative charge region was between 7,5 and 9 km, and the upper positive between 9 and 14,5 km. In the case of the November 27 storm, the lower positive, negative, and upper positive charge regions were located between 4 and 6 km, 6 and 8,5 km, and 8,5 and 16 km, respectively.

Conclusions: In general, the heights of the charge regions in both thunderstorms are similar to those found by the COLMA network located in Santa Marta, Magdalena. Lightning leaders were corroborated which reached maximum heights of 15,88 km, slightly lower than those reported in the northern region of Colombia.

Keywords: charge structure, lightning leader, lightning mapping array, lightning flash, thunderstorm

Acknowledgements: The authors would like to thank the Keraunos company for supplying data from the Colombian network for Total Lightning Detection with LINET technology, as well as the Lightning Research Group of Universitat Politècnica de Catalunya for providing data on electrical thunderstorms from the LMA network in Barrancabermeja - Yondó.

Language: Spanish

Open access



Cite as: Ardila, B., Soto, E., Argüello, D., Tello, H., López, J., Montanyà, J. "Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano". *Ing*, vol. 27, no. 2, 2022. e17925. <https://doi.org/10.14483/23448393.17925>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Resumen

Contexto: A partir de la ubicación de la red Lightning Mapping Array LMA en límites de los municipios de Barrancabermeja y Yondó en 2018, se han tomado datos ininterrumpidos de descargas IC y CG que ocurren sobre esta zona de estudio. Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas tropicales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución y, por tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba - LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018.

Método: Basados en métodos de inspección, en la teoría del líder bidireccional, en las diferencias de propagación de líderes positivos y negativos y mediante un algoritmo de visualización de datos se definieron las alturas de los centros de carga de las tormentas estudiadas. Así mismo, usando información de la red LINET, se determinaron posibles descargas CG que ocurrieron en las ventanas de tiempo estudiadas con sus respectivas corrientes y polaridades.

Resultados: Ambas tormentas presentan una estructura tripolar; en la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se localizó entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa se identificó entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km. Para el caso de la tormenta del 27 de noviembre, las regiones de carga positiva inferior, negativa y positiva superior se localizaron entre 4 y 6 km, 6 y 8,5 km y 8,5 y 16 km respectivamente.

Conclusiones: En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta, Magdalena. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de 15 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia.

Palabras clave: descarga atmosférica, estructura de carga, líder de rayo, Lightning Mapping Array - LMA, tormenta eléctrica.

Agradecimientos: A la empresa Keraunos por el suministro de datos de la Red Colombiana de Deteción Total de Rayos con Tecnología LINET. Así mismo al grupo Lightning Research Group de Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en Barrancabermeja - Yondó.

Idioma: Español

1. Introducción

La estructura de carga de nubes de tormenta fue estudiada inicialmente a través de mediciones del campo electrostático producido por descargas atmosféricas usando el método del electrómetro esférico de Wilson [1]. Posteriormente se observaron propiedades eléctricas de tormentas tropicales oceánicas explicadas a través del proceso de electrificación de graupel [2] y se planteó una estructura de carga tripolar compuesta por una capa central negativa, una región positiva superior y una pequeña región positiva inferior [3].

Los primeros análisis de descargas atmosféricas usando sistemas Lightning Mapping Array - LMA se hicieron en Oklahoma y Nuevo México en 1999, basados en sistemas Lightning Detection and Ranging - LDAR. Este método calcula el tiempo de llegada (TOA) de la radiación impulsiva producida por fuentes emitidas durante la propagación de líderes de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF), lo que permite localizar cada fuente y de esta manera reconstruir tridimensionalmente una descarga eléctrica [4]. El estudio determinó la estructura de carga eléctrica de tormentas y concluyó que el evento inicial de las descargas intranube ocurre entre la región de carga negativa principal y la positiva superior y se denomina ruptura bipolar positiva.

Más adelante se determinó de manera teórica y experimental la precisión de la red de mapeo de rayos ubicada entre el noreste de Kansas y el este de Colorado, de donde se concluyó que las fuentes detectadas se localizan con una incertidumbre espacial de 6 a 12 metros en la horizontal y de 20 a 30 metros en la vertical y una incertidumbre temporal de 40 a 50 ns [5]. Estudios subsiguientes compararon mediciones de campo eléctrico con datos de sistemas LMA e indicaron que las fuentes de radiación iniciales en un rayo ocurren en o cerca de la ubicación del inicio de la descarga dentro de un radio que varía entre 30 y 400 metros, lo que permitió usar en adelante las redes LMA para determinar la ubicación del inicio de una descarga eléctrica [6].

Mediante estas redes también se ha caracterizado la velocidad de propagación de líderes de rayos. En [7] se encontró que los líderes iniciales en descargas intranube comienzan a una velocidad mediana de aproximadamente $1,6 \times 10^5$ m/s y se desaceleran durante los primeros 10 a 15 ms de la descarga. Posteriormente usando esta misma metodología se mostró que los líderes escalonados que ocasionan una descarga negativa se propagan a velocidades cercanas a $1,3 \times 10^5$ m/s [8]. Estos sistemas se han usado en su mayoría en zonas templadas como España en donde se caracterizó el desarrollo de líderes bidireccionales y se demostró que la diferencia de velocidad cambia el potencial del líder [9]. En Estados Unidos se relacionó la estructura de carga de tormentas con la altitud de las descargas [10] y se realizaron otras investigaciones en zonas tropicales como Brasil en donde también se estudiaron propiedades de nubes de tormenta [11].

Dentro del marco del proyecto de ASIM (www.asim.dk) y con el apoyo de la Universidad Politécnica de Cataluña se instaló por primera vez en el país una red LMA denominada Colombian Lightning Mapping Array - COLMA ubicada en Santa Marta entre los años 2015 y 2017. Los primeros hallazgos determinaron que las nubes de tormenta en zonas tropicales tienen una extensión vertical de entre 3 y 15 km de altura y que la mayoría de líderes de rayo inician cerca de los 10 km de altura, 2 km más altos en comparación con tormentas estudiadas en España [12]. Posteriormente se encontró que las tormentas tropicales en la zona presentan una estructura tripolar en la que la región de carga positiva superior se encuentra entre 10 y 15 km, la negativa central entre 6 y 9 km y la positiva inferior entre 4 y 6 km, estas dos últimas se ubican entre 2 y 3 km por encima de tormentas medidas en Florida y se hallaron además líderes que se propagaron a alturas de hasta 16 km [13].

En 2018 la Universidad Politécnica de Cataluña, con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander UIS y la empresa Keraunos, decidió trasladar la red COLMA al Magdalena Medio con el fin de caracterizar tormentas tropicales en una región de alta actividad de rayos. Para este estudio la red se ubicó entre los municipios de Barrancabermeja y Yondó, y tomó el nombre de Dabeiba - LMA, inspirado en la bondad Dabeiba de la cultura indígena Katia. Las ubicaciones de las estaciones se observan en la Figura 1 donde cuatro de ellas corresponden a campos petroleros de Ecopetrol (Lisama, La Cira, Llanito y Casabe) y las restantes se localizan en la sede de la UIS en Barrancabermeja y en la Unipaz (Instituto Universitario de la Paz). La zona sombreada corresponde al radio de influencia de la red Dabeiba - LMA (45 km medidos desde la estación Unipaz) en donde la eficiencia en la detección y localización de las fuentes emitidas por líderes de rayos es óptima.

Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas ecuatoriales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución; por lo tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba -

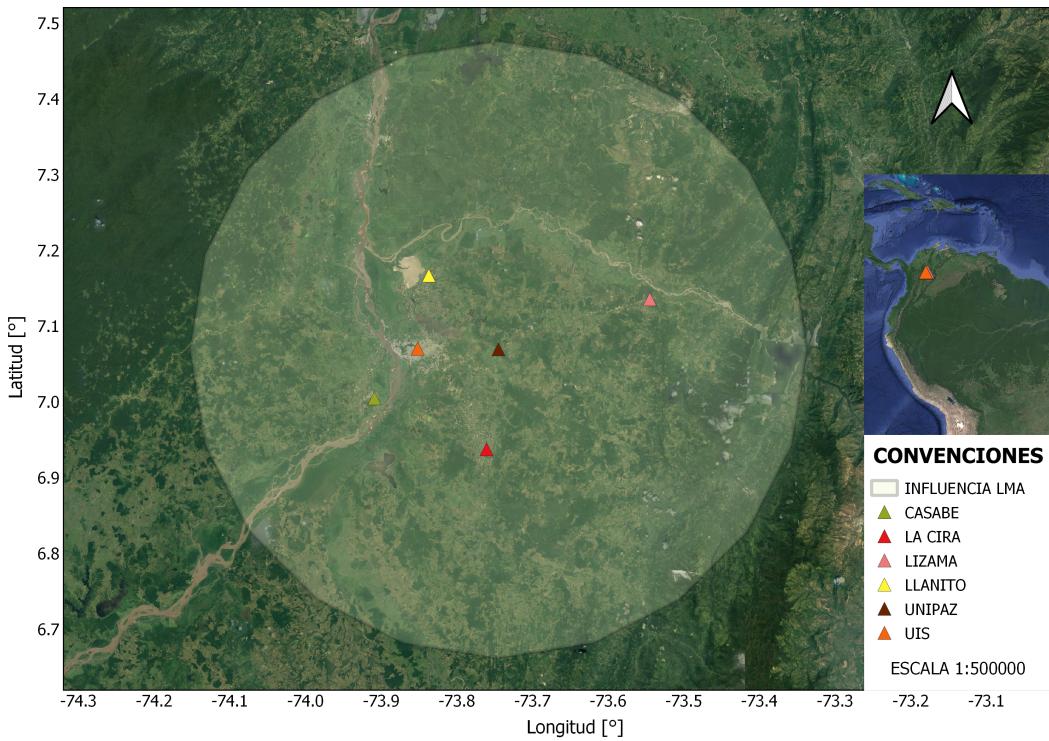


Figura 1. Ubicación de los sensores de la red Dabeiba - LMA en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, Santander

LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018. Se usa el método de inspección y la teoría del líder bidireccional para analizar descargas individuales a través del gráfico de tiempo-distancia desarrollado en [9], el cual compara las velocidades de propagación de los líderes mapeados y de esta manera permite encontrar su polaridad e inferir la estructura de carga de la nube de tormenta. Dado que las redes LMA pierden eficiencia en la detección de fuentes a alturas bajas, p. ej. a un kilómetro, se incluye información de la red LINET que localiza los impactos de rayo ocurridos durante las tormentas estudiadas.

Este artículo presenta en su segunda sección la metodología aplicada con el fin de delimitar las alturas de los centros de carga, muestra a modo de resultados en su tercera sección algunos ejemplos de las descargas individuales que se estudiaron con el fin de demarcar cada una de estas regiones. En la cuarta sección se discuten los resultados obtenidos y se comparan con los encontrados en otros estudios, y por último en su quinta sección presenta a modo de conclusiones las características encontradas en estos dos casos de estudio en cuanto a altura de las regiones de carga y alturas de iniciación y de propagación de líderes mapeados.

2. Metodología

2.1. Determinación de la estructura de carga

La teoría del líder bidireccional expuesta por primera vez en [14] afirma que las descargas atmosféricas se inicien entre regiones de carga con polaridad opuesta, debido al elevado campo eléctrico que existe entre ellas, y se extienden como árboles de doble extremo, uno negativo (líder negativo)

que se propaga sobre regiones de carga positiva, y uno positivo (líder positivo) en dirección contraria sobre regiones de carga negativa [15], [16].

Basados en lo anterior se logra determinar regiones de carga a través de la localización de fuentes VHF emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayos, entendiendo que un líder negativo es más visible que un líder positivo en las frecuencias de radio usadas por la red LMA, lo que da como resultado líderes negativos densamente mapeados en comparación con los líderes positivos [4]. Esto indica que una descarga atmosférica tiene un número relativamente mayor de fuentes mapeadas dentro de las regiones de carga positiva involucradas en su desarrollo en comparación con las fuentes mapeadas en regiones de carga negativa [16].

La determinación de esta última región se logra parcialmente a través de líderes de retroceso que son líderes negativos que se desplazan hacia el origen de la descarga a través de los canales ionizados que dejan los líderes positivos cuando no logran seguir propagándose [17]. Estos líderes intentan re-ionizar el canal formado por el líder positivo. Teniendo en cuenta lo anterior y entendiendo que los líderes positivos no producen una radiación significativa que detecte la red LMA, se usa la hipótesis de que los líderes de retroceso vuelven a trazar partes de los canales dejados por líderes positivos, lo que sirve para determinar parcialmente regiones de carga negativa que se caracterizan por una reducida cantidad de fuentes mapeadas [18]. La Figura 2 muestra una descarga bidireccional individual (flash) en donde se localizan las regiones de carga a través de la identificación de líderes positivos y negativos.

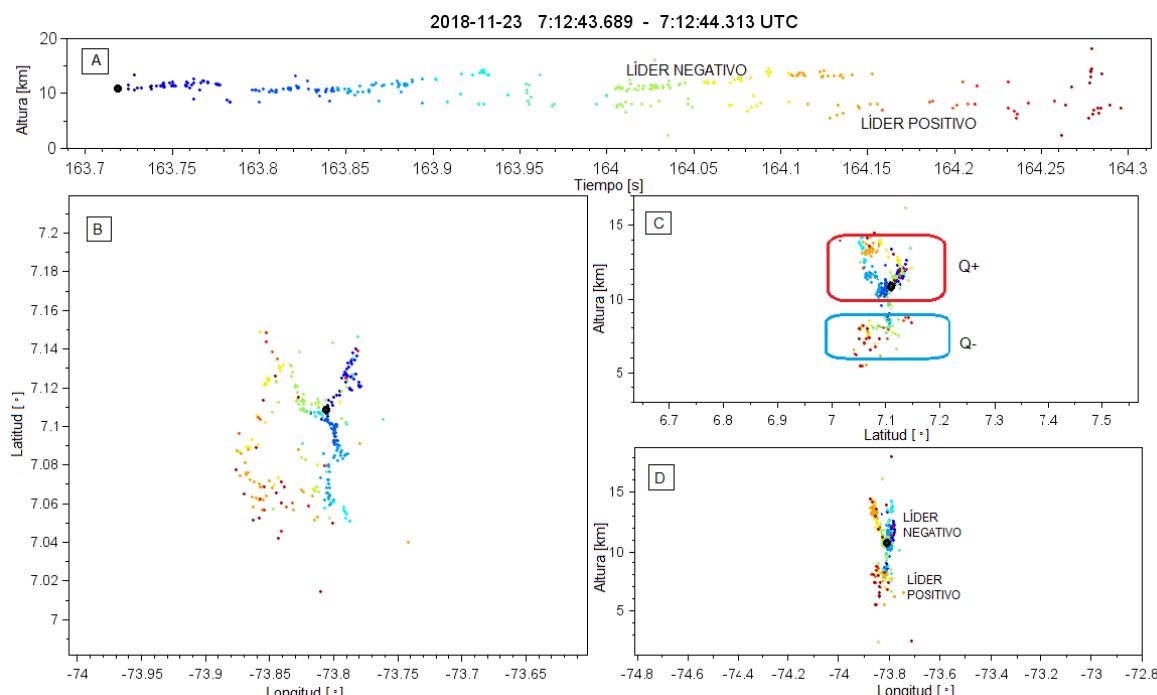


Figura 2. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC. El panel A representa la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud (0.1° en latitud es igual a 11,11 km), el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo (el color se usa para visualizar la ocurrencia temporal de la descarga) y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

2.2. Visualización de datos

Mediante el algoritmo LMA Zoom-Viewer desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña - UPC por el grupo de investigación Lightning Research Group - LRG se obtiene la ubicación espaciotemporal de las fuentes mapeadas en la propagación de líderes de rayo, usando paneles de diez minutos de duración como los de las Figuras 3 y 12 y a través de la evolución de descargas individuales mostradas en paneles como el de la Figura 4. Lo anterior permite definir las alturas de las regiones de carga usando el método de inspección, esto es, regiones de carga positiva identificadas por una gran cantidad de fuentes mapeadas y regiones negativas por un reducido número de fuentes. Este algoritmo determina la altura de iniciación de descargas y tasas promedio de rayos entre otros.

2.3. Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos LINET, propiedad de Keraunos SAS. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema Total Lightning que entrega parámetros para cada impacto de rayo (*stroke*) como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga, altura de emisión y forma de onda, usando técnicas de tiempo de arriba con modificaciones para obtener soluciones en 3D [19], [20].

Para la obtención de estos datos se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional con líneas base entre 90 y 140 km [13]. Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal. Los impactos de rayo (descarga nube-tierra) detectados por la red LINET se ubican dentro de los paneles del LMA Zoom-Viewer con los símbolos ‘X’ para impactos con polaridad de corriente negativa (-CG stroke) y ‘+’ para los que tienen polaridad de corriente positiva (+CG stroke).

2.4. Análisis tiempo-distancia de descargas (velocidad de propagación)

Se usa el gráfico de tiempo-distancia desarrollado por van der Velde y Montanyà [9], en el cual se reducen las dos dimensiones horizontales a una sola, llamada distancia a un punto de referencia, que corresponde al punto de inicio de la descarga, lo que permite que los ejes de tiempo y distancia sean relativos a la primera fuente de la descarga. Se presentan a lo largo del artículo dos tipos de gráficos de tiempo-distancia. En uno de ellos la coloración de las fuentes corresponde al tiempo, lo que permite identificar la polaridad de los líderes, dado que la variable del tiempo evita que se enmascaren entre sí. En el otro la escala de colores denota la altitud, luego el cambio de coloración de las fuentes permite determinar si un líder se propaga de forma ascendente o descendente.

De esta manera, la pendiente que se forma con las fuentes mapeadas da una noción de la velocidad de propagación del líder y por tanto de su polaridad. Aquellas fuentes que sigan la pendiente de menor inclinación hacen referencia a las velocidades de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y aquellas con mayor inclinación a líderes negativos (1×10^5 m/s a 1×10^6 m/s).

3. Resultados

3.1. Tormenta del 23 de noviembre de 2018

La Figura 3 muestra diez minutos del desarrollo espaciotemporal de una tormenta ocurrida el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC. El panel A representa la variación altura-tiempo de las fuentes mapeadas, las cuales forman descargas individuales (grupo de puntos verticales). El panel B corresponde a una distribución espacial en latitud-longitud de las descargas detectadas en la que se observa la evolución horizontal de la celda inferior entre 6.98 y 7.21 grados en latitud (aprox. 25,55 km) y entre -73.42 y -73.87 grados en longitud (aprox. 49,99 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente en donde se evidencian líderes de rayos que se propagan a alturas entre 1,71 y 15,18 km. En total se mapearon 17.375 fuentes de radiación impulsiva en VHF y se registraron 89 descargas individuales con una tasa promedio de siete rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura denota el tiempo y los puntos negros el inicio de cada descarga individual. Así mismo, durante estos diez minutos de actividad la red LINET registró 99 impactos de rayo (*strokes*) con una mediana de corriente de descarga de retorno de 21,1 kA.

A continuación se presentan algunos ejemplos del análisis realizado a las descargas individuales registradas en la Figura 3A. Se aclara que los resultados obtenidos no se basan únicamente en los ejemplos presentados con el fin de ilustrar la metodología. La Figura 4 presenta la distribución

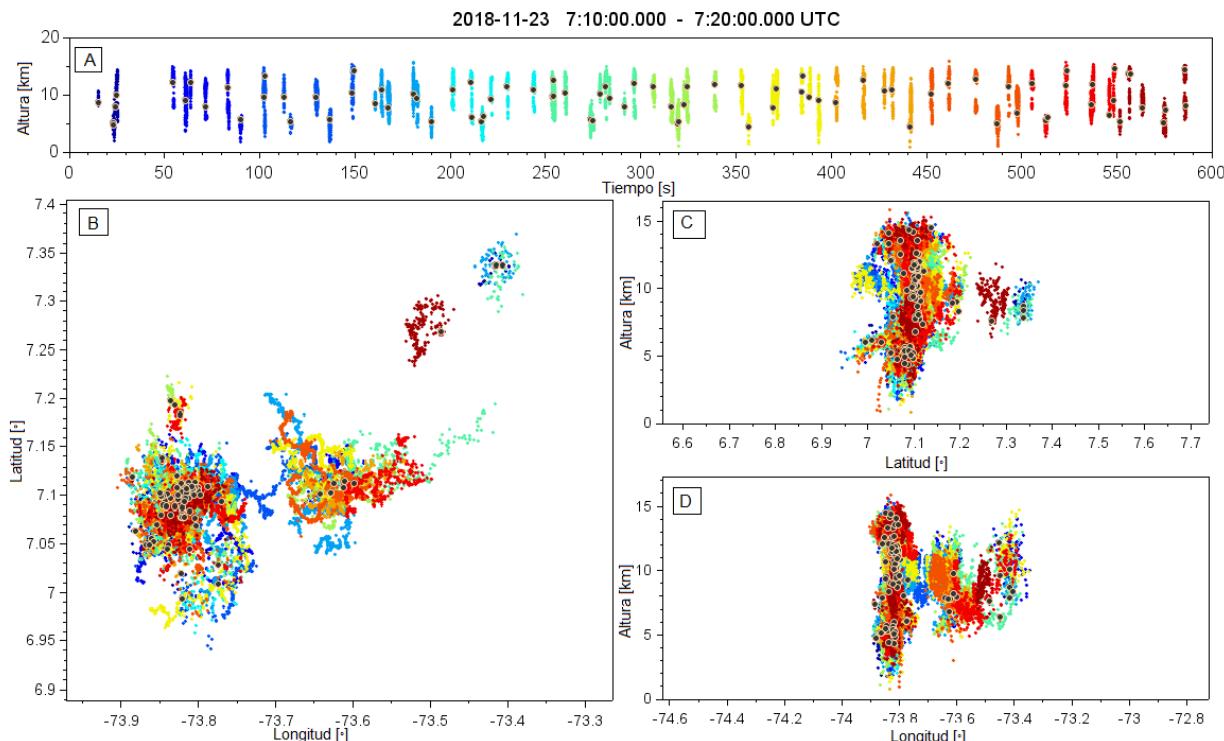


Figura 3. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos denotan las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

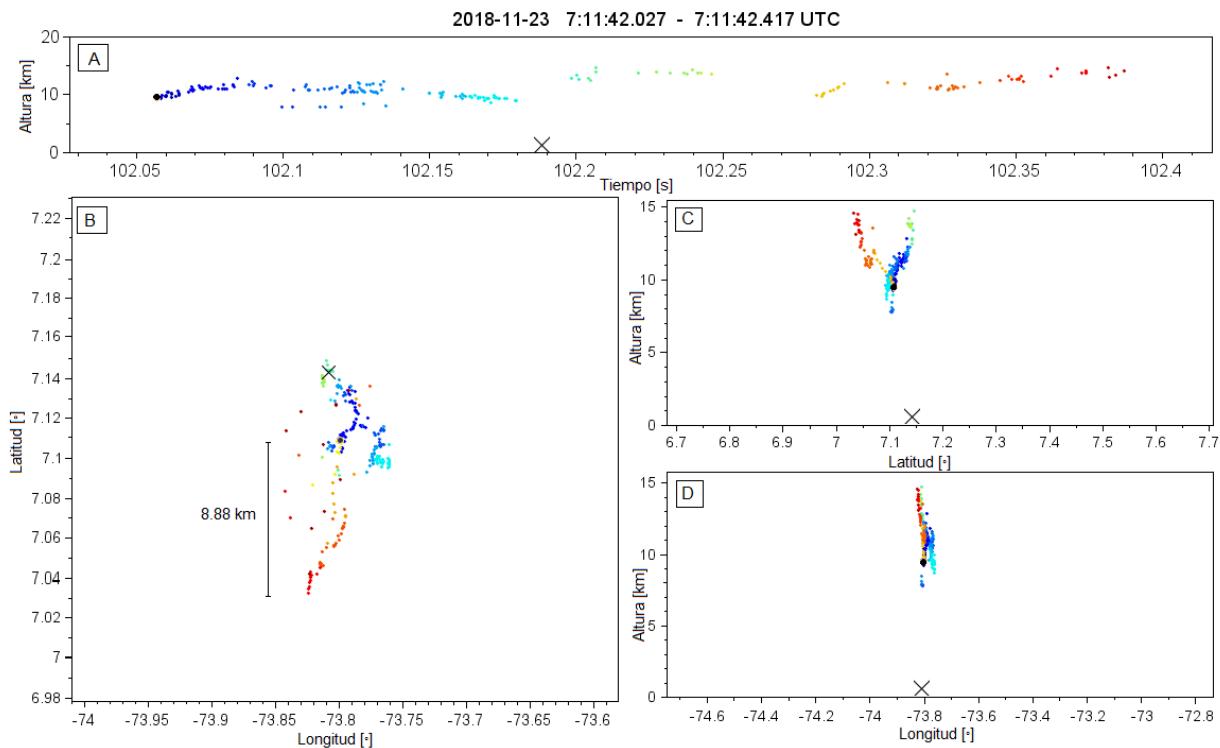


Figura 4. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:42.027 y las 7:11:42.417 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos son fuentes mapeadas secuencialmente en el tiempo, el círculo negro ubica el inicio de la descarga y el símbolo X corresponde a un impacto nube-tierra negativo (-CG stroke) registrado por LINET.

espaciotemporal de las fuentes mapeadas durante una descarga ocurrida entre las 7:11:42.027 y las 7:11:42.417 UTC que inicia a una altura de 9,5 km (origen de la descarga indicado por el punto negro) y se alcanza una extensión horizontal máxima de 8,88 km desde el origen de la descarga (ver panel B) a alturas entre 7,5 y 14,5 km (ver paneles C y D).

Los paneles A, C y D de la Figura 4 muestran el desarrollo bidireccional de la descarga, puesto que se observan fuentes que ocurren en el mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferentes alturas. Así mismo, la red LINET detecta un impacto -CG (símbolo X) a las 07:11:42.189 UTC en las coordenadas 7.141, -73.809 con una corriente de -12,1 kA.

La Figura 5 analiza la descarga individual presentada en la Figura 4 mediante dos gráficas de tiempo-distancia para las cuales la coloración de las fuentes en el panel A denota la altura y en el panel B el tiempo. El panel A permite observar un líder negativo ascendente que se propaga a velocidades cercanas a 1×10^5 m/s desde una altura de 9,5 km (tono verde claro) hasta alcanzar un máximo de 13 km (tono amarillo) transcurridos 0,05 segundos después el inicio de la descarga (punto 0,0); posteriormente, a los 0,13 segundos, el líder desciende a una altura mínima cercana a los 9 km delimitando la región de carga positiva superior entre 9 y 13 km de altura. En el intervalo de 0,05 y 0,35 segundos se observan algunas fuentes de líderes negativos de retroceso que se propagan sobre los canales ionizados por líderes positivos (en adelante a estas fuentes de retroceso se les llamará únicamente líderes positivos) a altitudes entre 7,5 y 9 km (tono celeste), lo que acota a

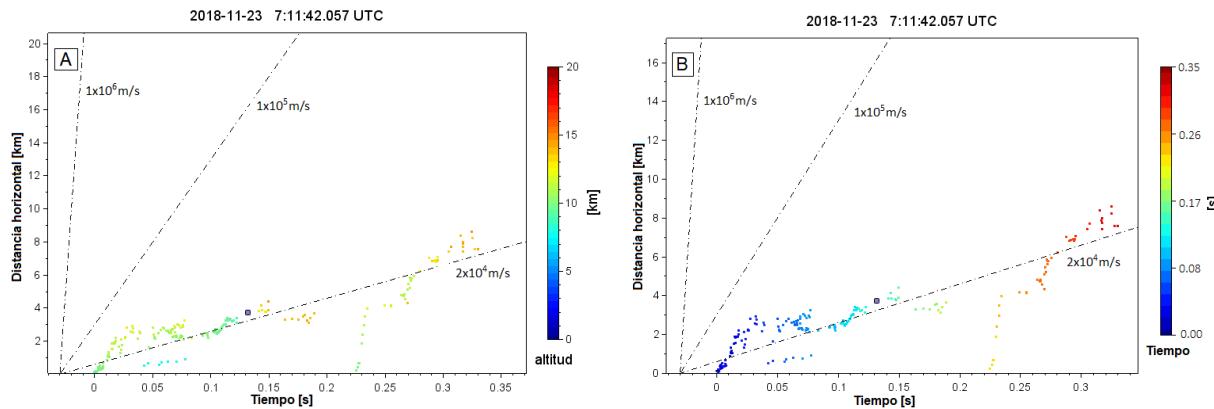


Figura 5. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 4. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada) y el recuadro ubica un impacto de rayo detectado por la red LINET. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

estas alturas la región de carga negativa central de la estructura de carga. La pendiente que forman estas fuentes se ajusta a los 2×10^4 m/s correspondiente a la velocidad media de propagación de líderes positivos.

Al cabo de 0,2 segundos del inicio de la descarga se observa un líder negativo ascendente que se propaga 0,15 segundos hasta una altura máxima de 15 km (tono naranja), lo que sugiere que este líder alcanza alturas de propagación elevadas típicas en tormentas tropicales como se ha mostrado en [13]. Al mismo tiempo se observan algunas fuentes de líderes negativos en tono celeste entre los 5 y 7,5 km que delimitan la región de carga positiva inferior.

El panel B evidencia el desarrollo temporal de la descarga e identifica fuentes que ocurren en un mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferente altura (diferencia de color en el panel A), lo que permite ubicar fuentes de líderes de retroceso en la región de carga negativa central.

La Figura 6 muestra una segunda descarga individual ocurrida entre las 7:11:00.974 y las 7:11:01.753 UTC que inicia a una altura de 9 km y se propaga de manera ascendente como lo muestran las fuentes en tono azul en los paneles A, C y D. Instantes después se mapean fuentes de un líder descendente a alturas entre 3 y 7 km (fuentes del panel A en tonalidad azul capri que pierden altura a lo largo del tiempo) y se registra un impacto -CG en las coordenadas 7.107, -73.840 con corriente máxima de -38.1 kA. Posteriormente se mapean fuentes de un líder ascendente (cambio de tonalidad celeste a verde en paneles A, C y D) a alturas entre 9 y 12 km el cual presenta múltiples ramificaciones y alcanza una extensión horizontal máxima de 12 km desde el punto de inicio de la descarga como se observa en el panel B.

La Figura 7 expone las gráficas de tiempo-distancia de la descarga mapeada en la Figura 6. En el panel A se observa un líder negativo ascendente que inicia a una altura de 9 km (punto 0,0) y se propaga a una altura máxima de 13 km como lo muestra el cambio de coloración de verde a amarillo en la primera pendiente. Transcurridos 0,1 segundos desde el origen de la descarga se observan algunas fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 8 km (tonos celestes) en donde se ubica la

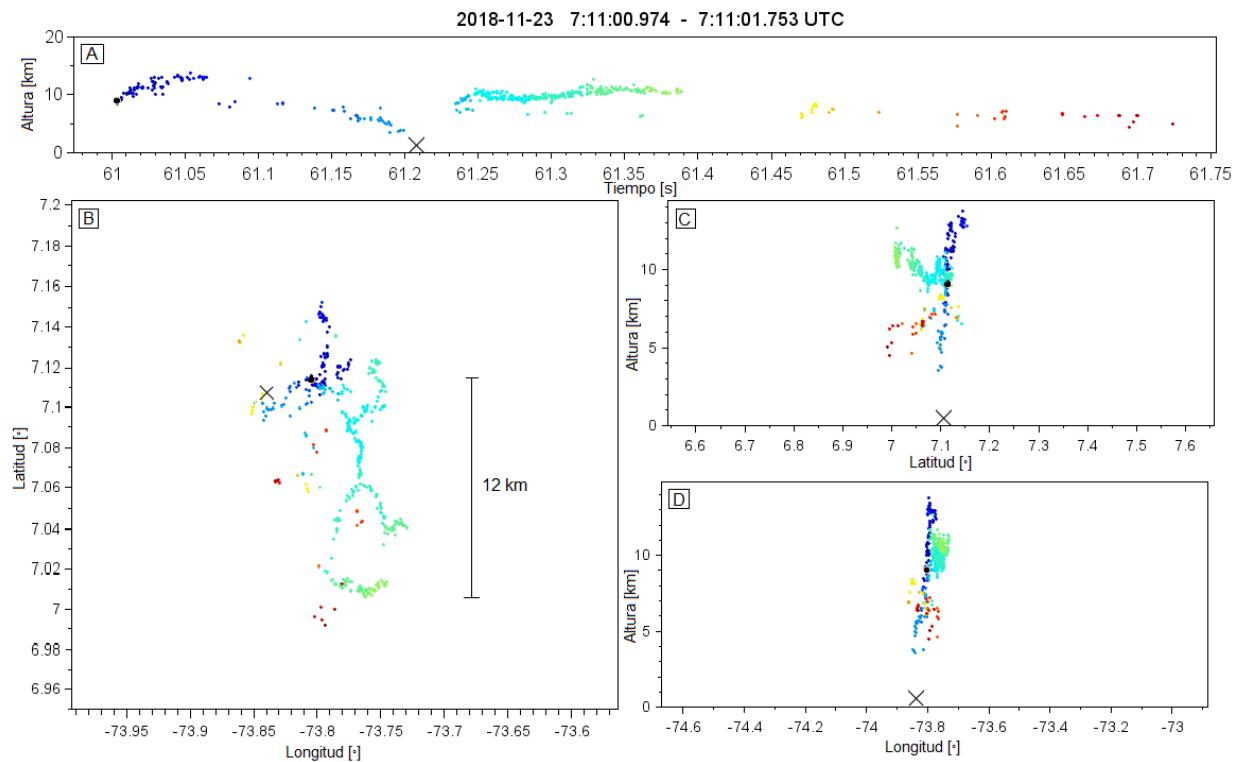


Figura 6. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:00.974 y las 7:11:01.753 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura- longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo, el círculo negro ubica el inicio de la descarga y el símbolo X corresponde a un impacto nube-tierra negativo (-CG stroke) registrado por la red LINET.

región de carga negativa. A los 0,15 segundos, a una altura de 7 km, un líder negativo descendente (indicado por la segunda pendiente con cambio de coloración azul capri) se propaga sobre la región de carga positiva inferior, cuyas últimas fuentes mapeadas se registran a alturas cercanas a los 3 km; instantes después la red LINET detecta la descarga -CG descrita.

A los 0,23 segundos del origen de la descarga inicia otro líder negativo (tercera pendiente) a alturas que varían entre 9 y 12 km denotada por las fuentes en tonos verde claro, este líder presenta algunas bifurcaciones sobre la región de carga positiva superior debido a los elevados gradientes de potencial generados por la estructura de carga y a la misma presencia del líder. Se observan fuentes emitidas por líderes positivos en los instantes de propagación de este último líder negativo y en instantes posteriores como lo evidencian las fuentes en tono celeste entre 0,35 y 0,7 segundos por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s. El panel B muestra la evolución temporal de la descarga en mención y permite evidenciar el desarrollo secuencial de los líderes, lo que resulta en una mejor interpretación de la propagación de líderes en los paneles de la figura anterior.

La Figura 8 muestra una descarga individual ocurrida entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC que inicia a alturas cercanas a los 10 km y se propaga en forma casi horizontal como lo evidencian las primeras fuentes en tonalidad azul del panel A. Instantes después se mapean fuentes que ganan altura con el tiempo hasta alcanzar los 15 km (tono celeste en los paneles A, C y D). Las fuentes en tonalidades verde-amarillo-naranja denotan otro líder que se propaga a alturas entre 10 y

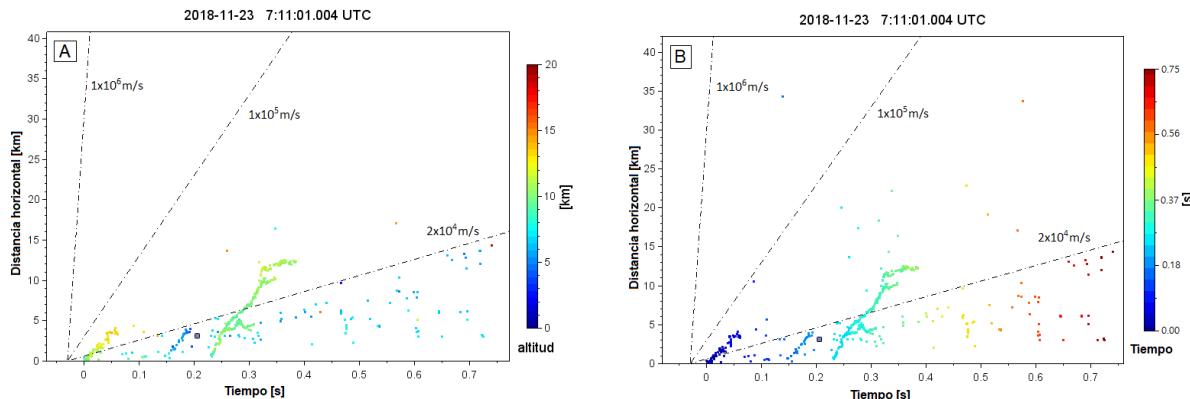


Figura 7. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 6. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada) y el recuadro ubica un impacto negativo detectado por la red LINET. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

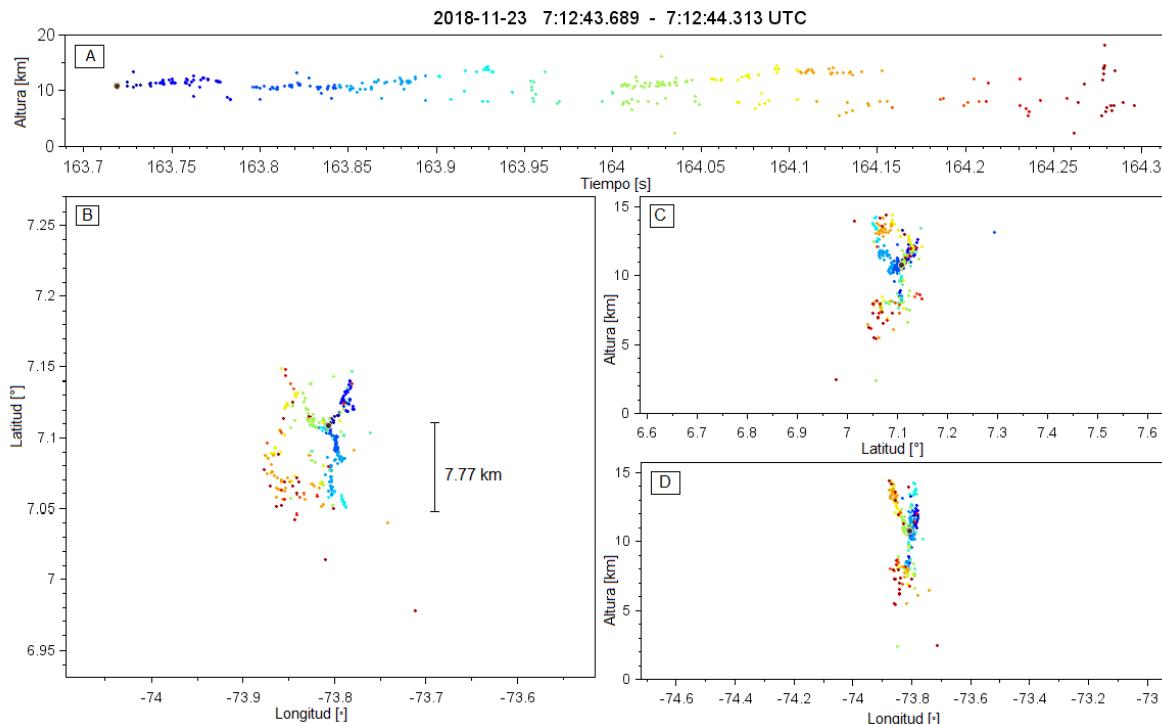


Figura 8. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura- longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

14 km, al mismo tiempo se mapean fuentes a alturas inferiores (ver panel A) que se relacionan con líderes de retroceso en la región de carga negativa. La descarga alcanza una extensión horizontal de 7,77 km desde el origen de la descarga evidenciados en el panel B.

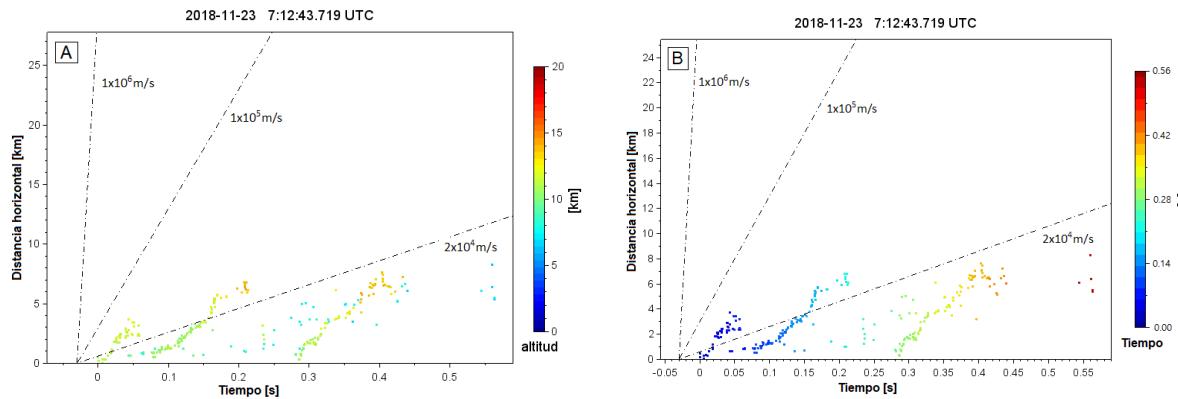


Figura 9. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 8. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ($2 \times 10^4 \text{ m/s}$) y de líderes negativos ($1 \times 10^5 \text{ m/s}$ y $1 \times 10^6 \text{ m/s}$).

En la Figura 9 se muestran las gráficas tiempo-distancia de la descarga descrita en la Figura 8. En el panel A se observan tres líderes negativos ascendentes (como lo evidencia el cambio de coloración de verde a amarillo-naranja en las pendientes) que se propagan a velocidades cercanas a $1 \times 10^5 \text{ m/s}$ y delimitan la región de carga positiva superior. El primero inicia a una altura de 10 km y se propaga hasta una altura máxima de 12,5 km, el segundo inicia a los 0,08 segundos del origen de la descarga y se eleva hasta una altura máxima de 14,5 km. El tercero inicia a los 0,29 segundos del origen de la descarga y alcanza una altura máxima de 14 km. De esta manera se define la altura máxima de la región de carga positiva superior en 14,5 km. Así mismo, se observan en color celeste las fuentes emitidas por líderes positivos a alturas en promedio de 8 km al mismo tiempo en que se propagan los líderes negativos. El panel B, cuya coloración denota el tiempo, permite evidenciar fuentes emitidas por líderes positivos, las cuales ocurren en el mismo instante (igual color) que se propagan los líderes negativos ajustados a la pendiente de $1 \times 10^5 \text{ m/s}$, pero a alturas inferiores (tono celeste de las fuentes en el panel A).

En la Figura 10, paneles A, C y D, se observa un líder que inicia a 10 km de altura hasta un máximo de 13 km para luego continuar propagándose hasta alturas mínimas cercanas a los 5,5 km. El líder alcanza una extensión horizontal total de 20 km desde el origen de la descarga como lo muestra el panel B, por lo que es probable que haya continuado propagándose horizontalmente fuera de la estructura de carga de la nube de tormenta. Los paneles C y D muestran el desarrollo bidireccional del líder que progresó en direcciones opuestas, el cual se determina dado que hay fuentes que ocurren en el mismo instante (igual tonalidad) pero a alturas sumamente diferentes, y como es de esperarse, el extremo positivo del líder presenta pocas fuentes mapeadas al mismo tiempo del desarrollo del líder negativo pero a alturas mucho menores.

La Figura 11 presenta dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga de la Figura 10. El panel A muestra la variación en altura en donde se evidencia el comportamiento ascendente-descendente de la descarga denotado por el cambio de la coloración de las fuentes entre verde (10 km) amarillo (13 km) y azul capri (5,5 km).

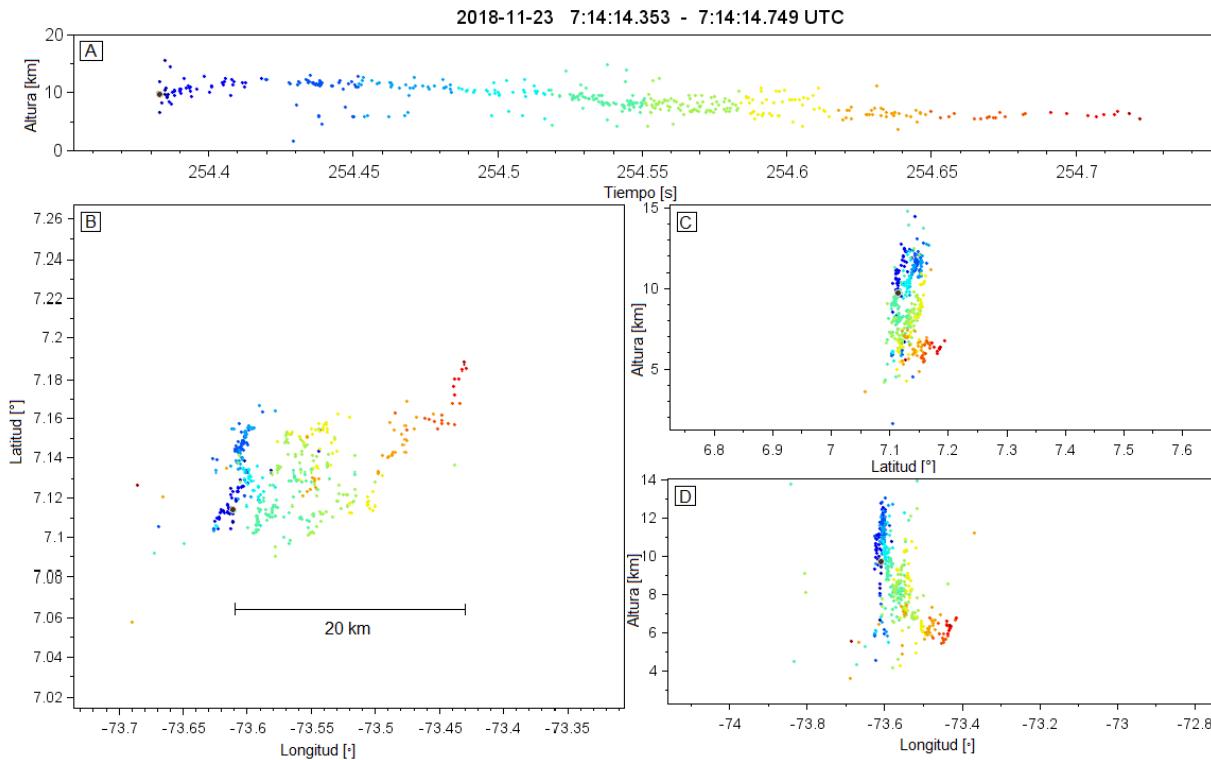


Figura 10. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:14:14.353 y las 7:14:14.749 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

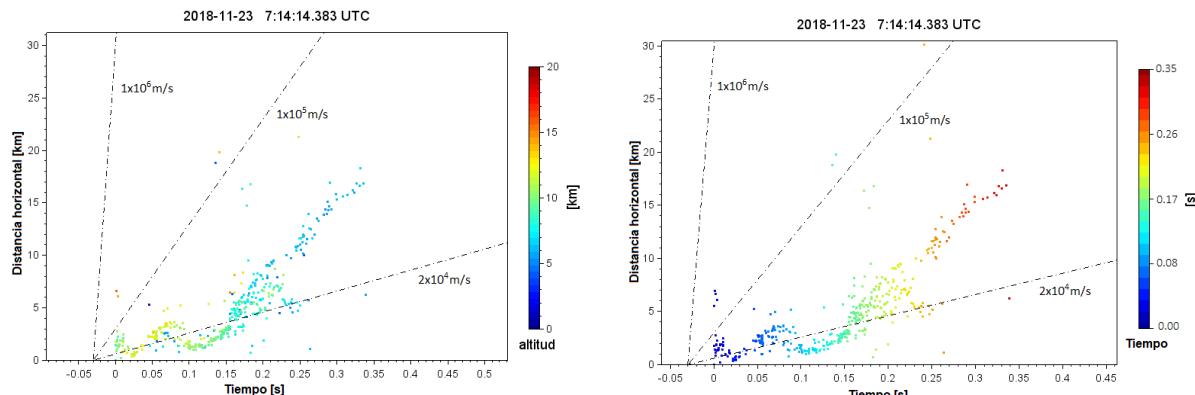


Figura 11. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 10. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

Una vez realizados los análisis de las descargas individuales se concluye que esta tormenta presenta una estructura tripolar en la que la región de carga positiva inferior se ubica entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa central entre 7,5 y 9 km y la región de carga positiva superior entre 9 y 14,5 km.

3.2. Tormenta del 27 de noviembre de 2018

La Figura 12 muestra diez minutos de actividad de una tormenta ocurrida entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC del 27 de noviembre de 2018. El panel A es una distribución temporal de la descarga en altura-tiempo en donde se observan líderes de rayo que se propagan en un rango de altura entre 2,96 y 15,88 km, lo que da una noción de la extensión vertical de la estructura de carga. El panel B es una distribución espacial en latitud-longitud en la que se evidencia el desarrollo horizontal de la tormenta entre 6.93 y 7.40 grados en latitud (aprox. 52,22 km) y entre -73.75 y -74.13 grados en longitud (aprox. 42,22 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente mediante los cuales se verifica el elevado desarrollo vertical de la tormenta.

Como datos generales se mapearon 26.476 fuentes y 100 descargas individuales con una tasa promedio de 10 rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura en mención corresponde al tiempo y los puntos negros señalan el punto de inicio u origen de cada descarga individual. Durante el desarrollo de estos diez minutos de actividad la red LINET registró 57 impactos de rayo (*strokes*) con una mediana de corriente de retorno de 18,1 kA.

Se presenta el análisis de algunas descargas individuales mostradas en la Figura 12A. La Figura 13 permite ver la disposición espaciotemporal de las fuentes localizadas durante una descarga ocurrida entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC que inicia a una altura de 8,5 km (punto negro) y se extiende horizontalmente una distancia máxima de 19,95 km desde el origen de la descarga

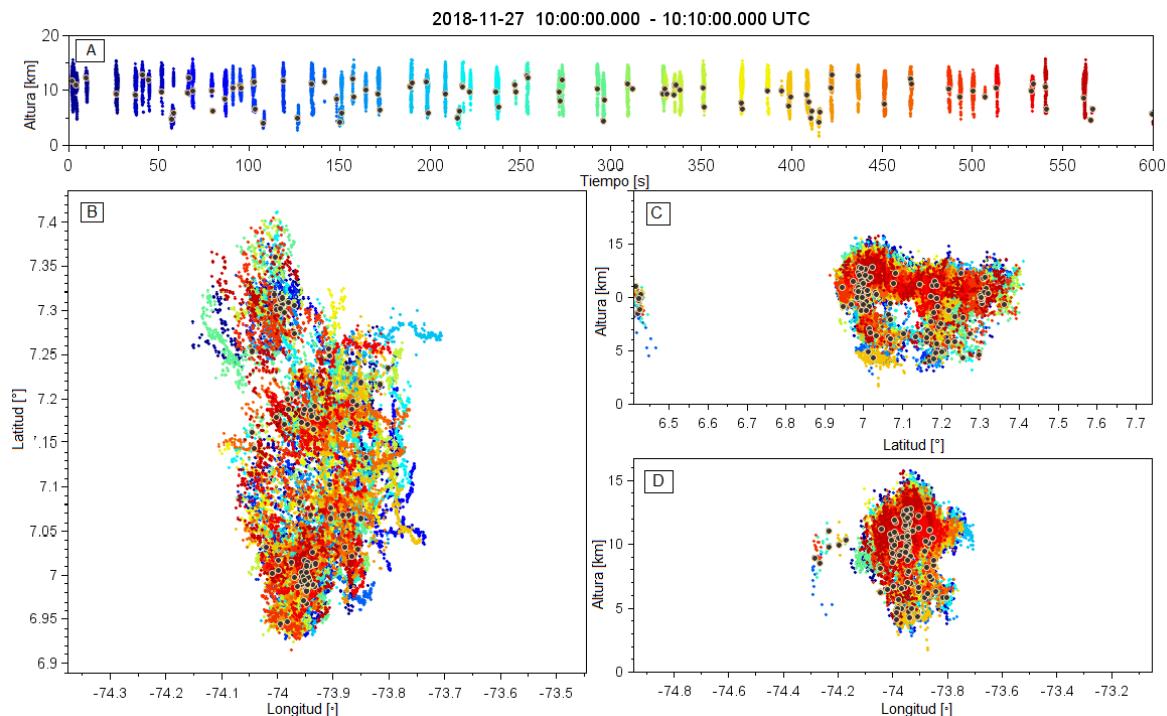


Figura 12. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales registradas en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

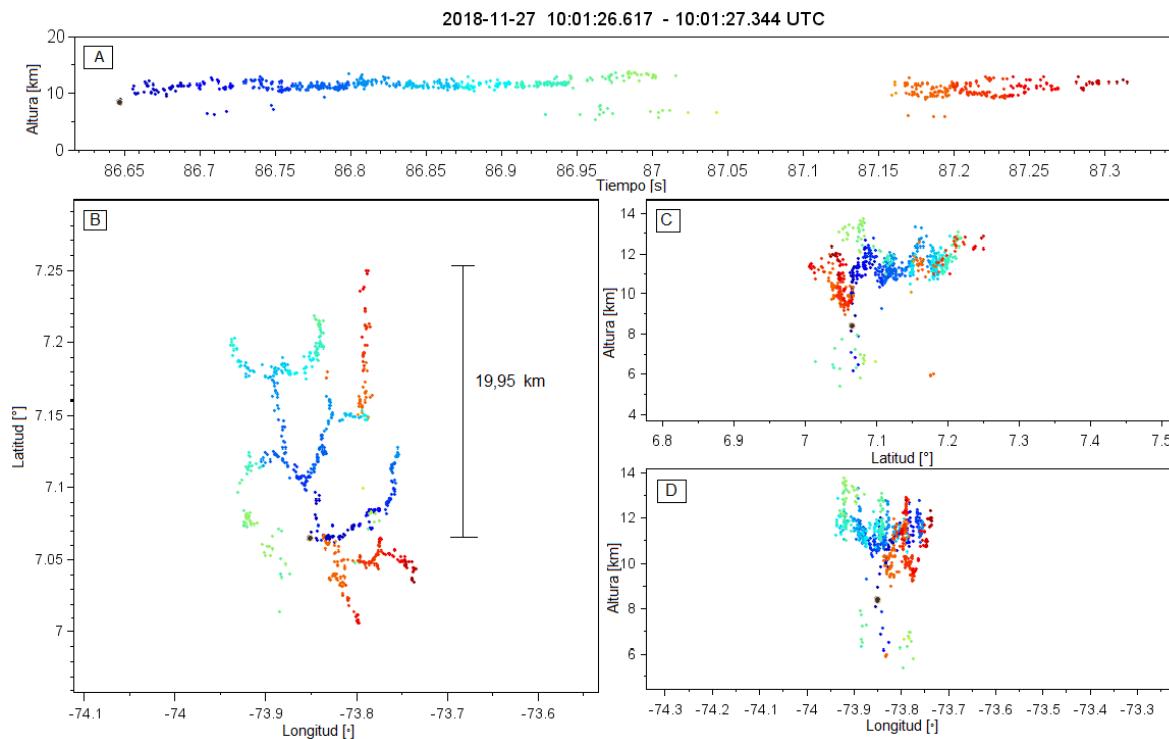


Figura 13. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura- longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

(ver panel B) a alturas entre 6 y 14 km, como lo muestran detalladamente los paneles A, C y D. Al mismo tiempo (igual coloración) se observan fuentes a alturas menores entre 6,6 y 8,5 km, las cuales revelan el desarrollo bidireccional del líder y corresponden a líderes positivos propagándose a través de la región de carga negativa. La polaridad de estos líderes se deduce por la poca densidad de fuentes mapeadas, lo que más adelante se comprueba con las gráficas de tiempo-distancia presentadas.

Con base en la descarga mostrada en la Figura 13, se presentan sus gráficas de tiempo-distancia en la Figura 14. El panel A muestra un líder negativo (primera pendiente) que inicia a alturas cercanas a 8,5 km y se propaga hasta alcanzar un máximo de 13 km de elevación, como lo muestra el cambio de coloración de verde a amarillo. A los 0,1 segundos del origen de la descarga inicia un nuevo líder ascendente (segunda pendiente) a una altura de 10 km y alcanza alturas máximas de hasta 13 km, este último presenta múltiples y largas ramificaciones como es característico en líderes negativos, se propaga horizontalmente una distancia de aproximadamente 16,05 km y permite ubicar la región de carga positiva superior de la nube de tormenta.

En el desarrollo de estos dos líderes descritos se observan fuentes emitidas por líderes positivos en alturas entre 6 y 8,5 km denotadas por las fuentes en coloración celeste en el panel A, lo que revela la altitud de la región de carga negativa central. Además, continuando con el mismo panel, se evidencia un líder negativo con pendiente negativa entre los 0,29 y 0,35 segundos, esto indica

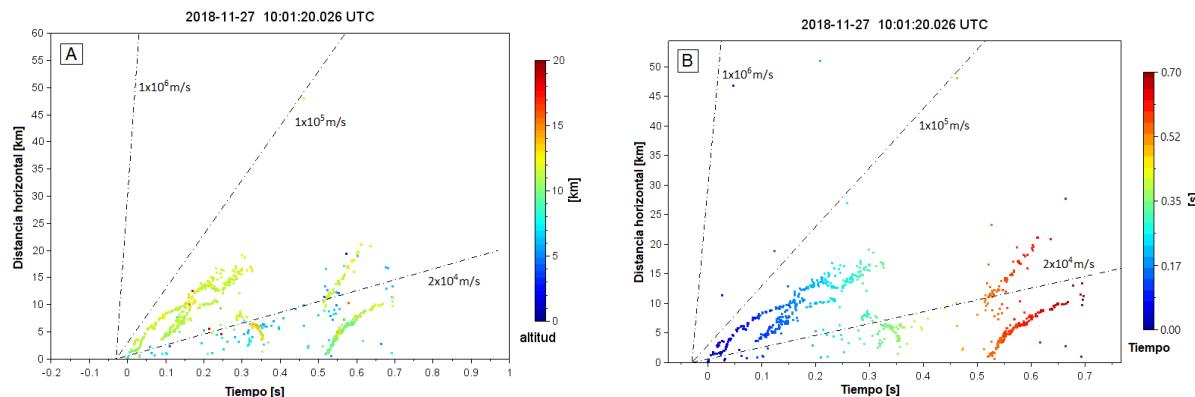


Figura 14. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 13. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

que se está acercando al punto de referencia (origen de la descarga en 0,0) pero ganando altura con respecto a este (como se evidencia en el cambio de coloración en altura de verde a naranja en la tercera pendiente). A los 0,53 segundos del origen de la descarga se inician simultáneamente dos líderes negativos ascendentes a alturas de 9 y 10 km y alcanzan alturas cercanas a los 12 km (cambio de coloración verde a amarillo de las dos últimas pendientes), lo que corrobora la ubicación de la región de carga positiva superior. La simultaneidad de estos dos líderes se observa en el panel B (variación temporal), donde las fuentes que conforman las dos pendientes ubicadas a la derecha aparecen con la misma coloración, lo que significa que ocurrieron entre los mismos instantes de tiempo. Así mismo, en este último panel se evidencian las fuentes de líderes positivos por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s al mismo tiempo que se propagan los líderes negativos a velocidades cercanas a 1×10^5 m/s.

En la Figura 15 se muestra una descarga mapeada entre las 10:01:58.663 y 10:01:59.234 UTC cuyo punto de iniciación se ubica a una altura de 11,5 km. Los paneles A, C y D permiten ver la altitud de las fuentes mapeadas, de donde se deduce que los líderes se propagaron a alturas entre 6 y 16 km con una extensión horizontal máxima de 8,33 km desde el origen de la descarga (ver panel B).

En la Figura 16 se presentan dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga analizada en la Figura 15. El panel A muestra un líder ascendente negativo que inicia a una altura de 11,5 km (tono amarillo) hasta alcanzar un máximo de 16 km (tono naranja) demarcando la región de carga positiva superior de la estructura de carga que para este caso se ubica entre 8,5 y 16 km. Paralelo al desarrollo de este líder aparecen fuentes emitidas por líderes positivos entre 7 y 8,5 km (tono celeste). Al cabo de los 0,3 segundos del inicio de la descarga se origina un nuevo líder negativo ascendente a una altura de 10 km alcanzando una altura máxima de 12 km, como lo denota el cambio de tonalidad de las fuentes de verde a amarillo. Se observan fuentes de líderes positivos a alturas entre 6 y 8 km (tono celeste) que corresponden a propagaciones muy bajas en la región negativa central, la cual queda delimitada entre 6 y 8,5 km.

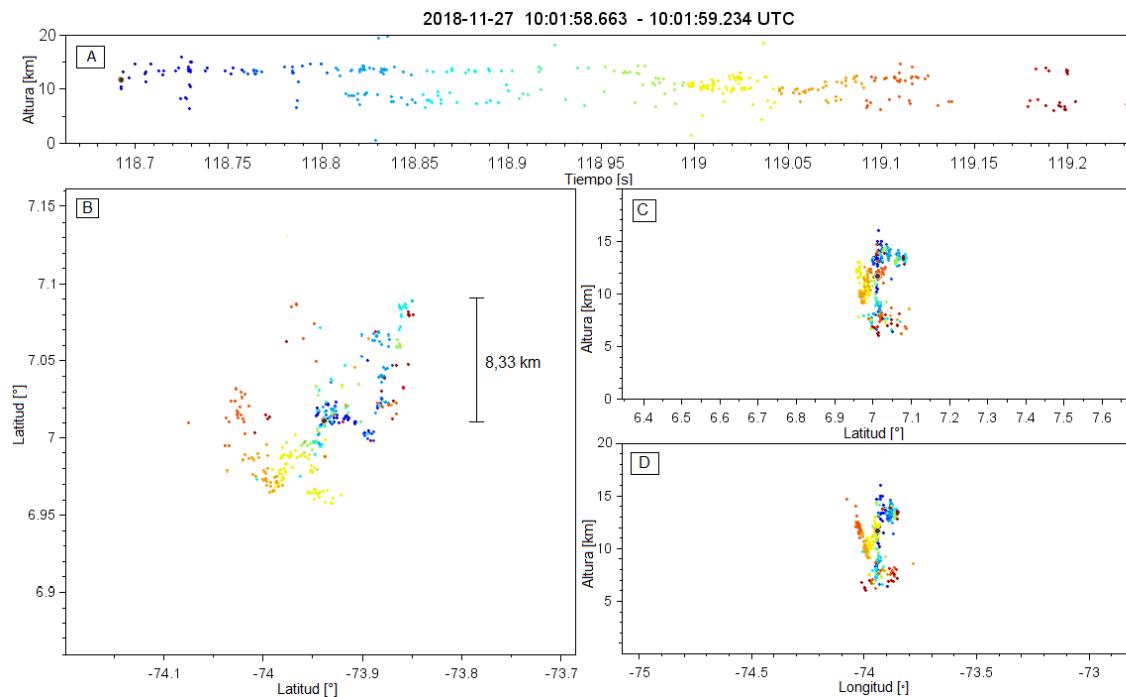


Figura 15. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26.617 y las 10:01:27.344 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

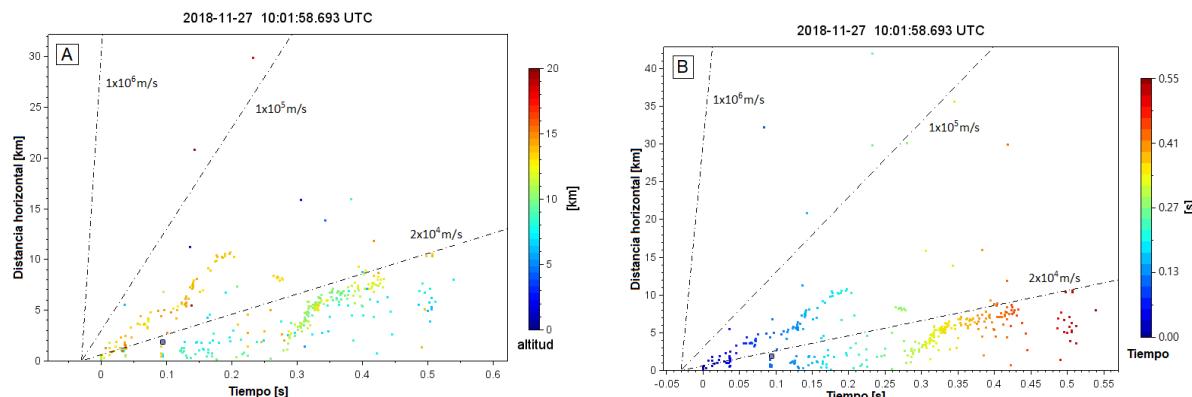


Figura 16. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 15. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

Para determinar si existe una región de carga positiva inferior se hace necesario analizar una descarga que inicie a alturas menores a 6 km, que es el límite más bajo de la región de carga negativa central. En la Figura 17 se presenta una descarga mapeada entre las 10:02:06.843 y las 10:02:07.281 UTC que se origina a una altura de 5 km y se propaga en el intervalo de 4 y 6 km (ver paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 6 km con respecto al origen de la descarga (ver panel B).

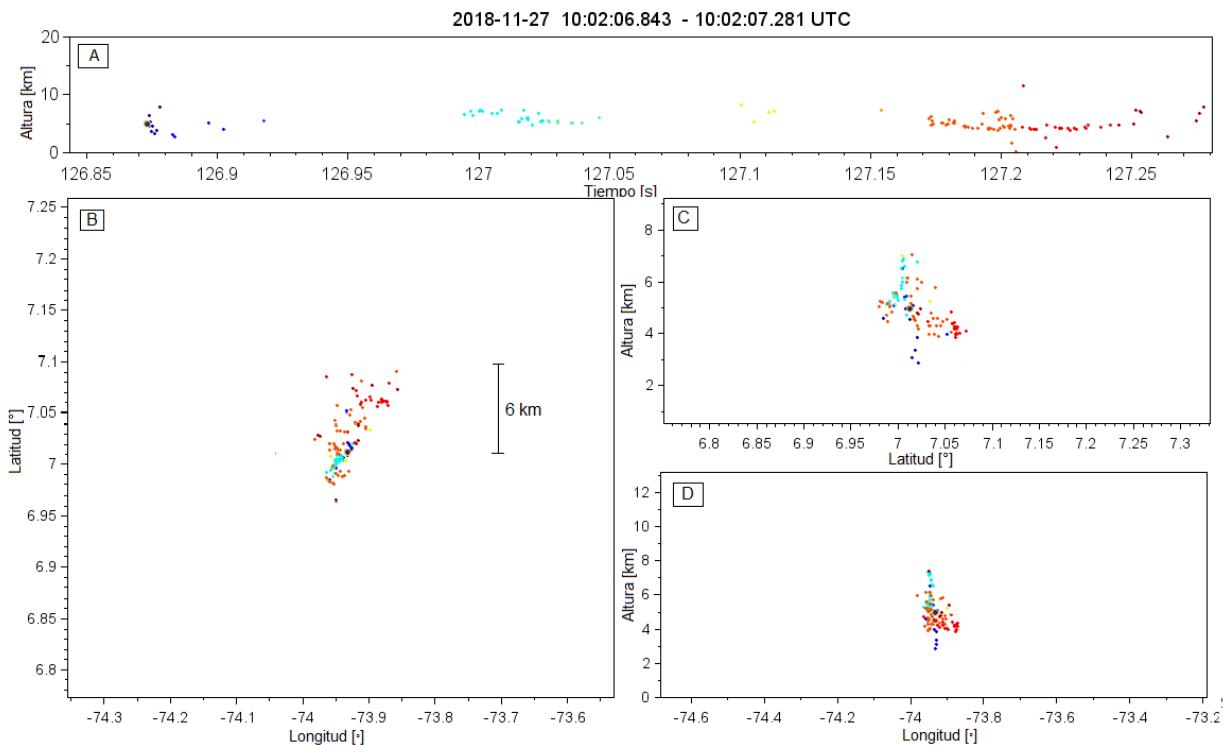


Figura 17. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:02:06.843 y las 10:02:07.281 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura- longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

La Figura 18 muestra las gráficas de tiempo-distancia de la descarga en la Figura 17, en donde se mapean tres líderes descendentes negativos a alturas entre 4 y 6 km, lo que se evidencia en el cambio de coloración de celeste a azul capri en las fuentes que forman pendientes cercanas a 1×10^5 m/s del panel A. De esta manera se delimita la región de carga positiva inferior entre 4 y 6 km. El panel B corresponde a la variación temporal de las fuentes. Para este caso no se mapearon fuentes emitidas por líderes positivos a alturas mayores.

La descarga que se muestra en la Figura 19 fue registrada entre las 10:06:38.393 y las 10:06:39.193 UTC y evidencia el comportamiento bidireccional de los líderes mapeados, dado que se observan fuentes emitidas en el mismo instante de tiempo (igual tonalidad) pero a diferente altitud (como lo evidencian los paneles A, C y D). Estas últimas pueden estar relacionadas con líderes positivos, lo cual se comprueba más adelante con base en las gráficas de tiempo-distancia. La descarga en mención inicia a una altura cercana a los 8,5 km a un rango de alturas que comprende los 5 y 13 km (paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 113,56 km desde el punto de inicio.

A partir de la descarga de la Figura 19 se construyen los gráficos de tiempo-distancia mostrados en la Figura 20. El panel A permite ver un líder negativo ascendente (primera pendiente desde el punto 0,0) que se propaga durante 0,05 segundos desde 8,5 km hasta alcanzar los 12,5 km de altura (cambio de coloración de celeste a amarillo). A los 0,05 segundos del origen de la descarga y

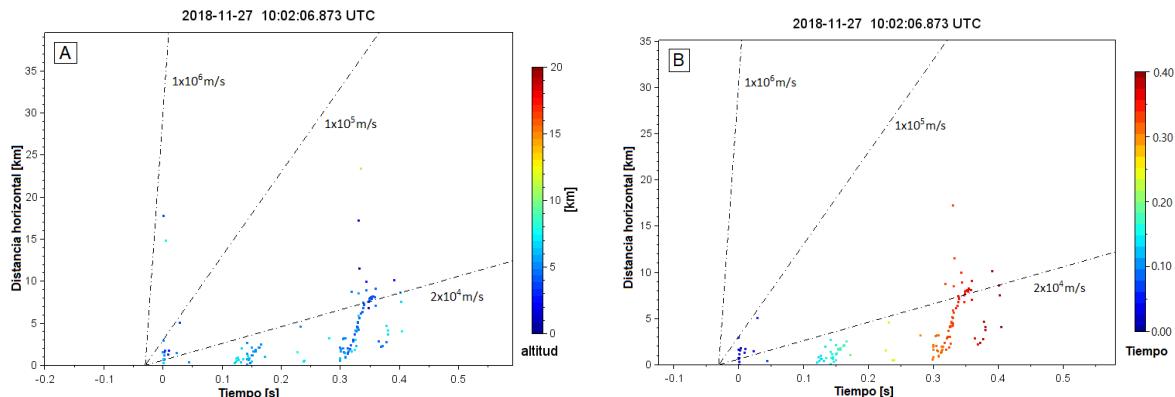


Figura 18. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 17. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

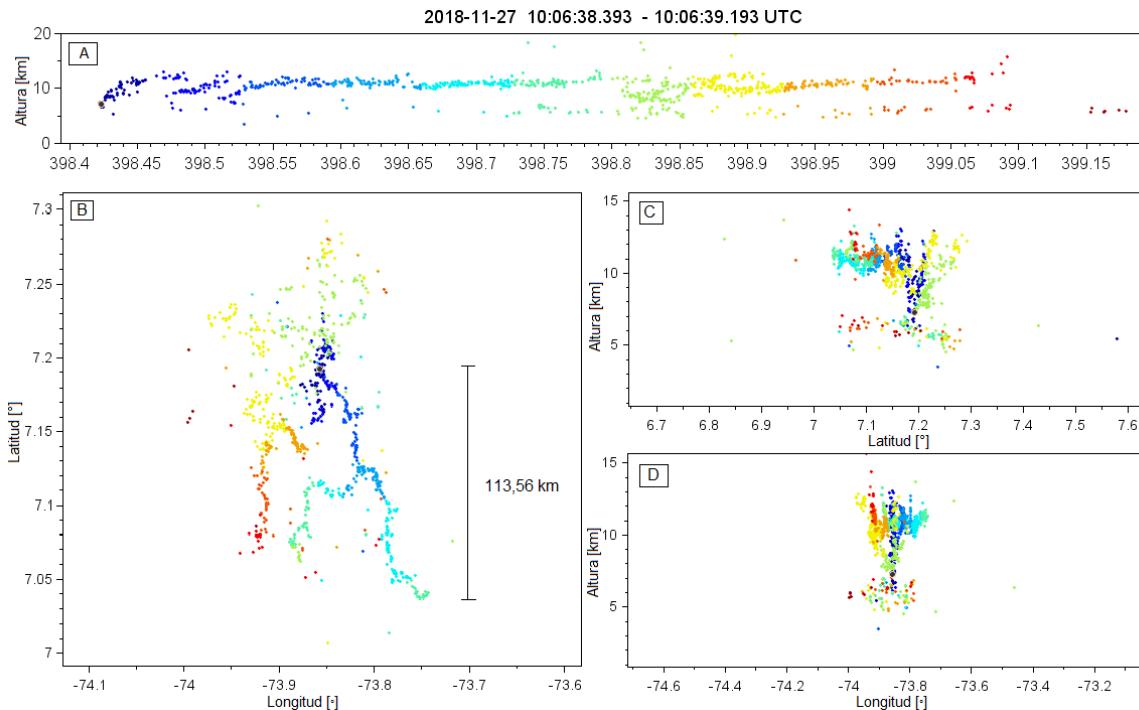


Figura 19. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:06:38.393 y las 10:06:39.193 UTC. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

a una altura de 10 km inicia un nuevo líder negativo ascendente que presenta dos ramificaciones pronunciadas (segunda pendiente bifurcada) y se propaga hasta los 0,4 segundos alcanzando altura máxima de 12 km y una extensión horizontal de 17 km. Durante la última fase de propagación de este líder (0,3-0,4 segundos) se observan fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 6 km (fuentes color azul capri por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s en el panel A), lo que corrobora

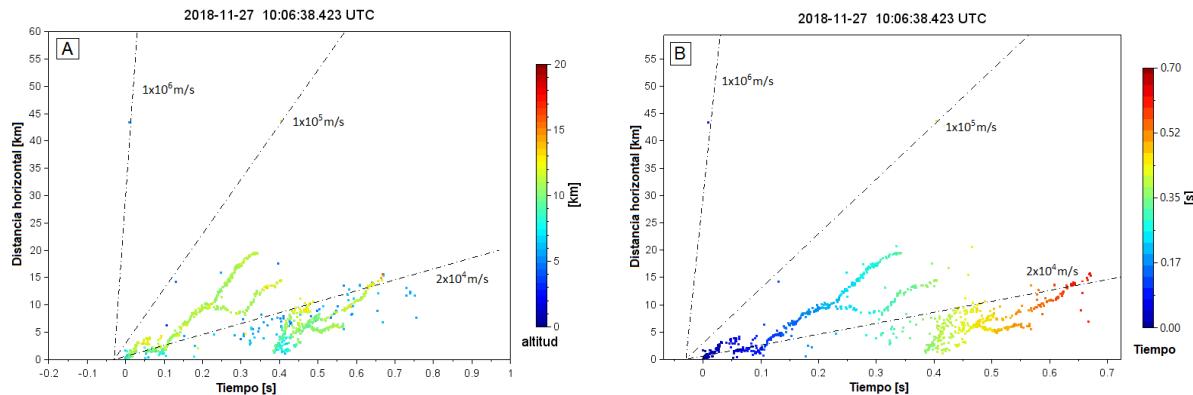


Figura 20. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 19. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. El punto 0,0 es el origen de la descarga o punto de iniciación. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

la ubicación de la región de carga negativa central de la estructura de carga. Este panel también revela el inicio de otro líder negativo ascendente (tercera pendiente con múltiples derivaciones) a una altura de 8,5 km (tono celeste), una vez transcurridos 0,4 segundos del origen de la descarga. El líder se propaga con varias ramificaciones hasta alcanzar una altura máxima de 13 km (tono naranja claro). Durante el desarrollo de este líder también se observan algunas fuentes de líderes positivos (tono azul capri) a alturas correspondientes a la región de carga negativa.

Según los análisis de las descargas individuales, de las cuales se presentaron algunos ejemplos anteriormente, se tiene que esta tormenta presenta una estructura tripolar donde el centro de carga positivo inferior se encuentra entre 4 y 6 km, la carga negativa central entre 6 y 8,5 km y la carga positiva superior entre 8,5 y 16 km de altura.

4. Discusión

El desarrollo temporal y espacial de las fuentes mapeadas durante la propagación de líderes de rayo determina que ambas tormentas estudiadas presentan una estructura tripolar cuyas alturas de las regiones de carga son congruentes con las anteriormente halladas en Santa Marta, donde se localizó la región positiva inferior entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 9,5 km y la positiva superior entre 10 y 14,5 km [13]. Las alturas de los centros de carga encontradas en este artículo son mayores a las de tormentas estudiadas en North Central Florida, donde la región de carga positiva inferior está entre 3 y 5 km, la positiva central entre 5,3 y 7,5 y la positiva superior entre 7,8 y 9,8 [21].

Se encontró que el 50 % de las descargas inició a alturas entre 6,62 y 11,48 para la tormenta del 23 de noviembre y entre 7,04 y 10,78 para la del 27 de noviembre, como lo indican el primer y cuarto cuartil de la Figura 21A.

Así mismo, las alturas máximas de inicio son 14,49 y 12,91 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta, que corresponden a 11 y 14 km. Para el presente caso de estudio,

el promedio de alturas de iniciación se situó entre 9,31 y 9,06 km mientras que en las tormentas analizadas en North Central Florida varió entre 7,3 y 8,4, lo anterior debido a que las regiones de carga en esas regiones de Florida se localizaron a alturas menores.

Se determinaron alturas máximas de propagación de líderes de rayo correspondientes a 15,18 km para la primera tormenta y a 15,88 para la segunda como lo indica la Figura 21B, estas alturas son un poco menores a las encontradas en [13]. Para la tormenta del 23 de noviembre se encontró que el 50 % de los líderes mapeados se propagó a alturas mayores a 9,11 km (como lo indica la mediana en la Figura 21B), en donde se encuentra la región positiva superior, mientras que para la tormenta del 27 de noviembre cerca del 75 % de los líderes siguió esta característica (primer cuartil en 8,19 km en la Figura 21B), lo que indica una mayor actividad en la región de carga superior de esta última tormenta en comparación con la primera. Lo anterior puede explicar que en la tormenta del 23 de noviembre hubiese más impactos a tierra CG (ver Tabla I) en comparación con la tormenta del 27 de noviembre, debido a que en la primera se presentó una mayor actividad en las regiones inferiores de la estructura de carga.

Como trabajos futuros se plantea estudiar la interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas en zonas tropicales con base en mapeos hechos con la red Dabeiba - LMA, y así mismo determinar la influencia de la altura de las regiones de carga en dicha interacción. Se muestra un resumen de resultados en la Tabla I.

Tabla I. Resumen de resultados

Parámetro	Unidad	Tormenta 23 de nov.	Tormenta 27 de nov.
Fuentes	-	17375	26476
Descargas	flashes	89	100
Impactos CG	strokes	99	57
Tasa de rayos	flashes/min	7	10
Mediana de corriente de descarga de retorno	kA	21,1	18,1
Máxima altura de inicio de descargas	km	14,49	12,91
Promedio de altura de inicio de descargas	km	9,31	9,06
Mediana de propagación de líderes	km	9,11	10,70
Máxima altura de propagación	km	15,18	15,88
Rango de la región de carga positiva superior	km	9 - 14,5	8,5 - 16
Rango de la región de carga negativa central	km	7,5 - 9	6 - 8,5
Rango de la región de carga positiva inferior	km	5 - 7,5	4 - 6

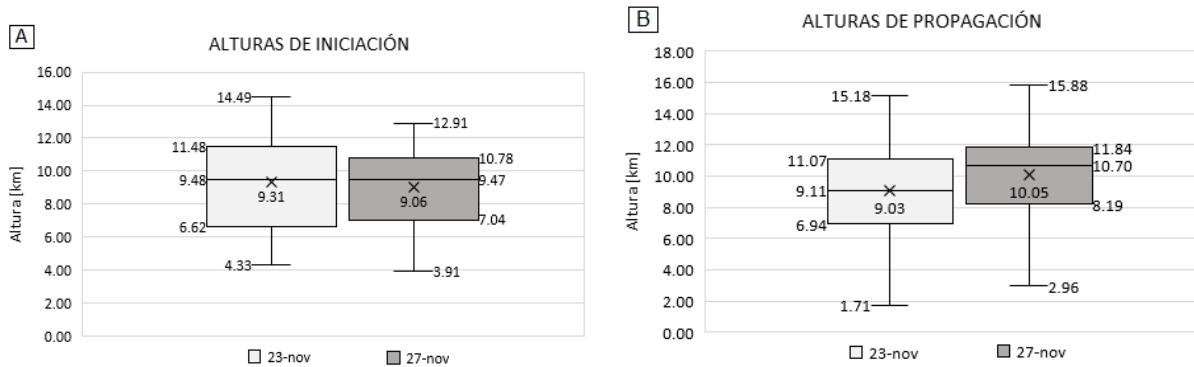


Figura 21. Diagramas de cajas y bigotes para las alturas de iniciación y de propagación de los líderes mapeados en las tormentas del 23 y 27 de noviembre de 2018. Los bigotes son los límites inferiores y superiores de los datos. Los límites de la caja indican los valores entre los cuales se encuentra el 50 % de los datos (primer y cuarto cuartil). La línea horizontal dentro de la caja y el símbolo X corresponden a la mediana y media respectivamente.

5. Conclusiones

La instalación de la red Dabeiba - LMA en Barrancabermeja (Santander) forma parte de los primeros estudios en Colombia usando un sistema de mapeo de alta resolución que, complementado con otros sistemas de detección total de rayos como la red LINET, permitió concluir que para los casos de estudio presentados:

1. Se lograron identificar estructuras de carga eléctrica con distribuciones típicas tripolares en las dos tormentas estudiadas.
2. Para la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se ubicó entre 5 y 7,5 km, la negativa central entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km.
3. Para la tormenta del 27 de noviembre la región de carga positiva inferior se encontró entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 8,5 km y la positiva superior entre 8,5 y 16 km.
4. En ambas tormentas se logró localizar la región de carga positiva inferior por lo que fue predominante la actividad de descargas nube-tierra.
5. En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta (Magdalena) y mayores a las de North Central Florida.
6. Se registraron líderes negativos y positivos que se propagaron a velocidades radiales máximas de 1×10^6 m/s y 2×10^4 m/s respectivamente.
7. Las alturas máximas de inicio para ambas tormentas corresponden a 14,49 y 12,91 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta.
8. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de propagación de 15,18 y 15,88 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia en Santa Marta.

Las conclusiones anteriores son el resultado del análisis de los dos casos de estudio y no se generalizan a todas las tormentas mapeadas en el área de influencia de la red Dabeiba - LMA.

Estudios posteriores darán indicios de las características generales de estructuras de carga en zonas tropicales en diferentes meses y condiciones meteorológicas.

6. Agradecimientos

Se dan especiales agradecimientos a la empresa Keraunos SAS por suministrar la información de rayos LINET de la ciudad de Barrancabermeja. Así mismo al grupo Lightning Research Group de Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en la misma ciudad.

Referencias

- [1] C. P. Wang, “Lightning discharges in the tropics: 1. Whole discharges”, *J. Geophys. Res.*, vol. 68, no. 7, pp. 1943-1949, 1963. <https://doi.org/10.1029/JZ068i007p01943> ↑2
- [2] T. Takahashi, “Electrical properties of oceanic tropical clouds at Ponape, Micronesia”, *Mon. Weather Rev.*, vol. 106, no. 11, pp. 1598-1612, 1978. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106<1598:EPOOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<1598:EPOOTC>2.0.CO;2) ↑2
- [3] E. R. Williams, “The tripole structure of thunderstorms”, *J. Geophys. Res.*, vol. 98, no. D11, pp. 13151-13167, 1989. <https://doi.org/10.1029/JD094iD11p13151> ↑2
- [4] W. Rison, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, T. Hamlin, and J. Harlin, “A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, no. 23, pp. 3573-3576, 1999. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856> ↑2, 5
- [5] R. J. Thomas *et al.*, “Accuracy of the lightning mapping array”, *J. Geophys. Res. D Atmos.*, vol. 109, no. D14, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004549> ↑3
- [6] T. C. Marshall *et al.*, “Observed electric fields associated with lightning initiation”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 3, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004GL021802> ↑3
- [7] S. A. Behnke, R. J. Thomas, P. R. Krehbiel, and W. Rison, “Initial leader velocities during intracloud lightning: Possible evidence for a runaway breakdown effect”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 110, no D10, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004JD005312> ↑3
- [8] G. S. Zhang *et al.*, “Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes”, *Sci. China Earth Sci.*, vo. 53, no. 4, pp. 591-602, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0116-x> ↑3
- [9] O. A. van der Velde, and J. Montanyà, “Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 24, pp. 13504-13519, 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JD020257> ↑3, 4, 6
- [10] B. R. Fuchs, and S. A. Rutledge, “Investigation of lightning flash locations in isolated convection using LMA observations”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 123, no. 11, pp. 6158-6174, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JD027569> ↑3
- [11] L. A. T. Machado *et al.*, “The Chuva project: How does convection vary across Brazil?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 95, no. 9, 2014. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1> ↑3
- [12] J. A. López *et al.*, “First data of the Colombia lightning mapping array - COLMA”, International Conference on Lightning Protection 2016. <http://hdl.handle.net/2117/99049> ↑3
- [13] J. A. López *et al.*, “Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 10, pp. 5503-5515, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188> ↑3, 6, 9, 20, 21
- [14] H. W. Kasemir, “A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge”, *J. Geophys. Res.*, vol. 65, no. 7, pp. 1873-1878, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i007p01873> ↑4
- [15] E. R. Williams, “Problems in lightning physics—The role of polarity asymmetry”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, 2006. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/2/S12> ↑5
- [16] K. C. Wiens, S. A. Rutledge, and S. A. Tessendorf, “The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure”, *J. Atmos. Sci.*, vol. 62, no. 12, 2005. <https://doi.org/10.1175/JAS3615.1> ↑5

- [17] V. Mazur, and L. H. Ruhnke, “Common physical processes in natural and artificially triggered lightning”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 98, no. D7, pp. 12913-12930, 1993. <https://doi.org/10.1029/93JD00626> ↑⁵
- [18] V. Mazur, “Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 94, no. D3, pp. 3311-3325, 1989. <https://doi.org/10.1029/JD094iD03p03311> ↑⁵
- [19] H. D. Aranguren, “Colombian total lightning detection network and early detection of failure risks for power systems”, *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 7, pp. 1-6, 2013. ↑⁶
- [20] D. F. Del Río, “Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano” (Trabajo de grado - Doctorado), 2018, Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. <http://bdigital.unal.edu.co/63551/1/93061400.2018.pdf> ↑⁶
- [21] J. A. Caicedo, M. A. Uman, and J. T. Pilkey, “Lightning evolution in two North Central Florida summer multicell storms and three winter/spring frontal storms”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 123, no. 2, pp. 1155-1178, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JD026536> ↑²⁰

Brandon Ardila-Murillo

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Correo electrónico: braneste07@hotmail.com

Edison Soto-Ríos

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería - Línea Automática de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Coordinador Académico del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander.

Correo electrónico: easotor@uis.edu.co

Didier Argüello-Barbosa

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander; formó parte del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Actualmente desempeña actividades de diseño de subestaciones de media tensión.

Correo electrónico: fernandoarguello24@gmail.com

Heribert Tello-Rodríguez

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander; formó parte del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Actualmente desempeña actividades de diseño de instalaciones eléctricas.

Correo electrónico: heribert.tello17@hotmail.es

Jesús López-Trujillo

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Correo electrónico: jesus.alberto.lopez@upc.edu

Joan Montanyà

Ingeniero Industrial, MSc. y Ph.D. en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España). Profesor asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Realizó varias estancias cortas en la Universidad de Arizona (Tucson, EE.UU.), El Laboratoire d’Aérologie (Toulouse, Francia) y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (Cambridge, EE.UU.). Correo electrónico: joan.montanya@upc.edu