

Ciencias Físicas

Artículo de revisión

Caracterización de parámetros del rayo en Colombia con base en sistemas de localización terrestres y satelitales, 20 años de análisis

Characterization of lightning parameters in Colombia based on terrestrial and satellite lightning locating systems, a 20 years analysis

Camilo Younes-Velosa

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia

Artículo de posesión para admisión como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Se presenta una revisión de los avances en la investigación en torno a los parámetros del rayo en Colombia en los últimos 20 años a partir del uso de bases de datos de sistemas de localización de rayos terrestres y satelitales que han permitido caracterizar el fenómeno de manera adecuada en un país como Colombia cuyos niveles de actividad eléctrica atmosférica y características geográficas y orográficas, además del hecho de estar ubicado en zona tropical, lo convierten en un caso especial que exige su comprensión con base en la hipótesis de la variación espacial y temporal de los parámetros del rayo planteada hace tres décadas. En el estudio se presentan los resultados relacionados con los siguientes parámetros del rayo: densidad de descargas a tierra, nivel cerámico, polaridad y multiplicidad, así como el análisis de los efectos de las irregularidades del terreno en la propagación de las ondas electromagnéticas radiadas por la descarga de retorno y la forma en que las actividades antropogénicas, especialmente la emisión de material en partículas, inciden en la electrificación atmosférica.

Palabras claves: Parámetros del rayo; Sistemas de localización de rayos; Descargas eléctricas atmosféricas.

Abstract

In this paper, we review research results on lightning parameters in Colombia during the last 20 years by analyzing databases of terrestrial and satellite lightning locating systems to adequately characterize this natural phenomenon in a country such as Colombia whose electric atmospheric activity and geographic and orographic characteristics, together with its location in a tropical zone, make the country a very special case that demands the comprehension of the phenomenon based on the spatial and temporal variations of the lightning parameters hypothesis formulated three decades ago. We present some results on the following lightning parameters: ground flash density, kneraunic level, polarity, and multiplicity, as well as on those concerning the effects of terrain irregularities on the electromagnetic wave propagation radiated by the return stroke and of anthropogenic activities, mainly the emission of particulate matter, on the electrification of the atmosphere.

Keywords: Lightning Parameters; Lightning Locating Systems; Lightning.

Introducción

El rayo es uno de los fenómenos naturales más estudiado en la historia moderna. Los experimentos sobre la electrificación atmosférica se encuentran en la literatura especializada desde el 10 de mayo de 1752, cuando se llevó a cabo el experimento propuesto y diseñado por Benjamin Franklin en Marly-la-Ville, cerca de París, para analizar y

Citación: Camilo Younes-Velosa. Caracterización de parámetros del rayo en Colombia con base en sistemas de localización terrestres y satelitales, 20 años de análisis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):960-973, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1171>

Editor: Jairo Roa Rojas

***Correspondencia:**

Camilo Younes-Velosa;
cyounesv@unal.edu.co

Recibido: 18 de marzo de 2020

Aceptado: 14 de agosto de 2020

Publicado: 5 diciembre de 2020



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

documentar los líderes ascendentes emanados de una punta captadora aislada de tierra usando botellas de vino (**Rakov & Uman, 2003**). **Franklin (1774)** publicó la prueba de las características eléctricas de los rayos, especialmente de su polaridad y, desde entonces, numerosos investigadores en el mundo han dedicado sus esfuerzos a la caracterización o parametrización de este fenómeno atmosférico.

A finales del siglo XIX, gracias a los avances tecnológicos ya existentes en la época, se estudiaron las características particulares del rayo, así como sus interacciones generales, ya que todavía no había claridad sobre la distribución de la actividad eléctrica atmosférica. Los primeros mapas del nivel cerámico se elaboraron en Francia a comienzos del siglo XX y, aunque el fenómeno venía siendo analizado localmente en los países donde mayores avances científicos había a la fecha (Francia, Inglaterra, Rusia, entre otros), todavía no era factible determinar los comportamientos globales, especialmente por las dificultades en las comunicaciones, las cuales se ampliaron solo a partir del desarrollo del telégrafo en la segunda mitad del siglo XIX.

A comienzos del siglo XX, los avances mencionados permitieron cimentar las condiciones para el planteamiento de teorías en áreas del conocimiento que se desarrollaban vertiginosamente, como la meteorología, lo que facilitó, por ejemplo, el planteamiento de la hipótesis del circuito eléctrico global, inicialmente estructurado por **Wilson (1920)**, que posteriormente muchos investigadores siguieron desarrollando, como lo ha explicado ampliamente **Torres (1998)**.

La hipótesis del circuito eléctrico global explicaba los fenómenos de carga y descarga entre la superficie de la Tierra y la ionósfera como generados por los grandes centros de generación constituidos por las nubes de tormenta e implicaba hacer un análisis certero de la distribución espacial y temporal de la actividad eléctrica atmosférica a nivel global.

Gracias a los avances de la electrónica y la computación durante la década de los 50, se presentaron los primeros avances en la medición de tormentas eléctricas mediante sistemas de medición de rayos de una sola estación. Los primeros reportes los hizo **Pierce (1956)** y, desde entonces, se han perfeccionado los sistemas de medición terrestres, aunque todos se basan en una de estas tres técnicas empleadas individualmente o en combinación: tiempo de llegada (*time of arrival*, TOA), detección de dirección magnética (*magnetic direction finding*, MDF) e interferometría.

Durante las últimas dos décadas ha habido un cúmulo importante de investigación, principalmente de la NASA, sobre la actividad de los rayos a nivel mundial a través de misiones espaciales como la *Optical Transient Detector (OTD)* y la *Lightning Imaging Sensor (LIS)* (**Boccipio, et al., 2000**; **Boccipio, et al., 2002**), que ha permitido tener una visión de la actividad de los rayos a nivel global mediante el análisis de imágenes y señales ópticas satelitales, con lo que se ha ratificado la hipótesis planteada por **Torres (1998)** sobre la variación espacial y temporal de los parámetros del rayo y su predominante actividad en la zona tropical continental.

Asimismo, al finalizar el siglo pasado, gracias al avance en los equipos de video de alta velocidad, comenzaron a registrarse y estudiarse los primeros fenómenos asociados con tormentas eléctricas a mesoescala, tales como los chorros azules (Bluejets) y los espectros rojos (Red Sprites) o elfos (Elfs). (**Lyons & Williams, 1993**, **Boccipio, et al., 1995**; **Lyons, 1996**).

Recientemente, gracias al uso de herramientas de cómputo avanzadas, como las presentadas por **Mostajabi, et al. (2020)**, ha sido posible analizar más profundamente las relaciones del rayo con otros fenómenos atmosféricos. Además, con el uso de cámaras de alta velocidad, tecnologías de detección y monitoreo en 3D de la actividad eléctrica atmosférica (como el *Lightning Mapping Array*, LMA) y el análisis de misiones como las del *Lightning Imaging Sensor (LIS)* de la NASA, se han reportado los primeros eventos de descargas eléctricas en la atmósfera superior colombiana, entre ellos el reportado por **Van der Velde (2019)**, y se ha confirmado que en el territorio colombiano se encuentran varios de los puntos con mayor densidad de descargas a tierra (DDT) del mundo (**Albrecht, et al., 2016**).

Durante las últimas décadas se llevaron a cabo en Colombia diversos estudios sobre el fenómeno del rayo y su caracterización, los cuales fueron recopilados recientemente (Torres, 2017; Torres, *et al.*, 2015; Herrera, *et al.*, 2018); en ellos se confirma la preponderancia de la actividad de los rayos en el país y su naturaleza privilegiada para este tipo de estudios, cuya pertinencia responde, entre otros aspectos, a las altas tasas de mortalidad y morbilidad debidas al fenómeno (Cruz-Beranal, *et al.*, 2018), así como a su impacto económico y social, como lo han analizado ampliamente para los Estados Unidos continentales (*contiguous United States*, CONUS) Koshak, *et al.* (2015), y para la zona montañosa, Soto & Pérez (2019). Por otra parte, la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia bajo estas condiciones ha sido analizada por Pérez, *et al.* (2020).

A pesar de la sistematicidad de los estudios y del lugar que ocupa Colombia en la investigación sobre las descargas eléctricas atmosféricas a nivel internacional, todavía hay mucho desconocimiento del comportamiento de este fenómeno en lugares de alta actividad y especiales características geográficas, geológicas, orográficas, atmosféricas e, inclusive, antropogénicas, situados en el norte de Suramérica y caracterizados por altitudes de hasta más de 5.000 m s.n.m. y valles profundos y prolongados.

El territorio colombiano presenta una alta actividad eléctrica atmosférica, especialmente relacionada con la densidad de las descargas eléctricas a tierra (DDT) y la amplitud de la corriente del rayo (Pinto, *et al.*, 2007; Younes, *et al.*, 2004), lo que ha determinado que se adelanten investigaciones en lugares del territorio colombiano con condiciones climáticas extremas y cercanos a la línea ecuatorial (Aranguren, *et al.*, 2016, Rojas, *et al.*, 2017).

Estas características son importantes para entender sus efectos en los parámetros del rayo, por lo que en los últimos 15 años se han hecho estudios que involucran más integralmente los parámetros de este fenómeno físico con otro tipo de características.

En el presente estudio se hizo una recopilación de los resultados de la investigación adelantada en los últimos 20 años con la participación directa del autor, haciendo énfasis en los parámetros del rayo en Colombia y su interacción con otras características como las ya mencionadas.

Materiales y métodos

La mayor parte de los resultados se obtuvieron del análisis de la información suministrada por las redes de localización de rayos que han estado instaladas en Colombia desde 1997, período en el cual se han logrado recolectar suficientes datos que permiten empezar a hacer inferencias meteorológica y estadísticamente confiables.

Colombia ha tenido dos redes de localización de rayos. La primera, suspendida en el 2016, perteneció a la más grande empresa de transmisión de energía eléctrica del país (Intercolombia S.A. E.S.P.) y la segunda, instalada más recientemente, pertenece a una empresa privada de servicios y desarrollo tecnológico (Keraunos S.A.S.).

La primera red tuvo dos períodos de operación con tecnologías diferentes, por lo que, para efectos prácticos, en el presente artículo se asumieron como redes independientes. El primer período de operación fue de 1997 a 2001, cuando se contaba con seis sensores LPATSIII (*Lightning Position and Tracking System*) distribuidos en diferentes lugares del territorio colombiano, una unidad de procesamiento central que obtenía la localización e información básica de señales electromagnéticas de descargas de rayos (*strokes*) con base en el método TOA. En el segundo período, entre el 2007 y el 2015, se operaba con un sistema compuesto de seis sensores IMPACT LS7001 ubicados en lugares diferentes a la red original, los cuales determinaban el punto de impacto de los *flashes* nube-tierra mediante la combinación de los métodos MDF y TOA (Herrera, *et al.*, 2018).

Como se observa en la **figura 1**, la distribución de los sensores de las redes 1 y 2 están en la zona colombiana en donde se concentra más del 70 % de la población y de las actividades económicas (DANE, 2018) y que cubre las regiones andinas, de la costa caribe y pacífica, principalmente. Asimismo, la altitud en la que se encuentran los sensores varía entre apenas unos metros y cerca de 3.000 m s.n.m., lo que refleja la especial condición topográfica y orográfica del país, aspecto central de la discusión en el presente artículo.

La segunda red entró en operación en el 2012 y en la actualidad la componen 24 sensores que cubren una región mucho más amplia del territorio colombiano. Esta red utiliza la técnica de detección de rayos LINET, que se basa en la técnica TOA pero con un algoritmo adicional para utilizar información de señales VLF/LF de descargas nube-tierra e intranube. Esta red tiene una línea de base (distancia entre sensores) con un rango entre los 120 y los 420 km, ubicada en diferentes lugares que varían entre los 0 y los 2.800 m s.n.m.

Como se aprecia en la **figura 1**, la distribución espacial de los sensores de la segunda red es mucho mejor, ya que cubre una mayor extensión del territorio colombiano, incluidos dos sensores en países vecinos (Venezuela y Panamá). Este mayor número de sensores (24) aumenta la confiabilidad de sus datos y, por ende, del análisis, pues son más redundantes y están menos distanciados entre sí.

La información de las redes de localización de rayos que han operado en Colombia se utilizó para el análisis del comportamiento de los parámetros del rayo en el país. Dichas redes entregan información en bruto a través de un centro de procesamiento central con datos básicos de las descargas eléctricas atmosféricas detectadas (principalmente la ubicación espacial, latitud y longitud, y la amplitud de la corriente del rayo), lo que permite hacer análisis estadísticos y de minería de datos para caracterizar el fenómeno del rayo en una región dada.

Como todo sistema de medición, las redes de localización de rayos deben evaluarse para determinar su desempeño. Desde que se instalaron las primeras redes de localización de rayos a finales de la década de 1980 y principio de los 90, se estableció que para todo análisis de información proveniente de estos sistemas, los dos principales parámetros de evaluación del desempeño serían la exactitud de la localización (*Location accuracy*, LA) y la eficiencia de la detección (*detection efficiency*, DE).

La exactitud en la localización (LA) se asocia principalmente con las técnicas utilizadas para ubicar geoespacialmente el lugar de impacto de la descarga eléctrica atmosférica que, en la mayoría de las redes, implica análisis relacionados con las metodologías TOA, las cuales utilizan algoritmos de triangulación basados en la diferencia en el tiempo de llegada a diferentes sensores de la señal electromagnética generada por el rayo que se pretende localizar. Lo anterior hace que el análisis de los efectos causados en la propagación de dichas ondas electromagnéticas, especialmente los debidos a la conductividad del terreno y los obstáculos naturales como elevaciones montañosas, sean de crucial importancia. Esto ha sido objeto de recientes análisis por parte de varios autores, entre los que cabe mencionar a **Soto & Pérez (2019)**, **Karami, et al. (2019a)**, **Karami, et al. (2019b)**, y **Pulgarín (2020)**.

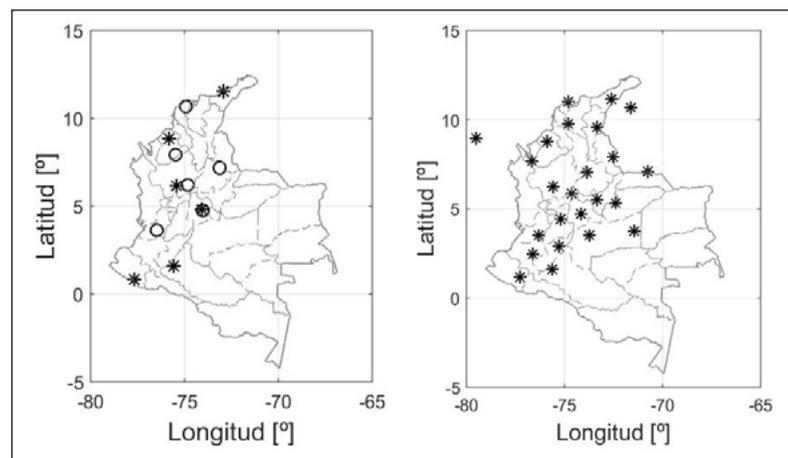


Figura 1. Ubicación espacial de las redes de localización. Izquierda: primera red ([o] 1997 – 2001, [*] 2007 – 2015). Derecha: segunda red (adaptado de **Herrera, et al., 2018**). Derecha: tercera red

La eficiencia en la detección (DE) y sus implicaciones en la caracterización de los parámetros del rayo, especialmente en la densidad de las descargas a tierra, se ha estudiado con mayor detalle por ser un parámetro con importantes implicaciones en la evaluación del riesgo por rayos, entre otras (Pinto, *et al.*, 2007; Younes, *et al.*, 2013; Zhang, *et al.*, 2016; Zhang, *et al.*, 2019). Dado que el porcentaje de rayos detectados por una red de localización con respecto al total de los producidos en cierta región mide su eficiencia, se debe partir del establecimiento de una red patrón. Para ello se han desarrollado diferentes metodologías, bien sea para correlacionar dos redes de localización de rayos terrestres (Diendorfer, *et al.*, 2009; Abarca, *et al.*, 2010) o para correlacionar redes de localización terrestres y satelitales (Younes, *et al.*, 2004; Thomas, 2000; Zhang, 2016).

El fenómeno del rayo se ha parametrizado con el fin de determinar su comportamiento espacial y temporal y así disminuir las altas tasas de morbilidad y mortalidad que provoca, con una mortalidad que alcanza a ser de tres por cada millón de habitantes, además de los miles de millones de dólares de pérdidas económicas anuales (Koshak, *et al.*, 2015; Cruz-Bernal, *et al.*, 2018). En la presente revisión se analizaron los resultados obtenidos durante los últimos 20 años en Colombia utilizando los datos de las redes de localización de rayos relativos a los siguientes parámetros: multiplicidad, densidad de descargas a tierra y polaridad.

La multiplicidad es un parámetro que surge de la física del rayo propiamente, ya que se pueden presentar una o varias descargas que, sumadas, conforman lo que se conoce en la literatura científica como un *flash*. Las redes de localización de rayos no detectan *flashes* sino las descargas individuales (*strokes*). Con el fin de analizar integralmente los parámetros a partir del fenómeno, se agruparon las descargas individuales usando el algoritmo de agrupamiento propuesto por Rakov & Huffines (2003), en el cual las descargas se agrupan en un *flash* si cumplen con los siguientes criterios: a) tienen puntos de impacto dentro de un radio de 10 km de la primera descarga, y b) no hay más de 500 ms de tiempo entre las descargas. La duración máxima de un *flash* es de 1 segundo y la multiplicidad máxima permitida es de 15.

La densidad de descargas a tierra (*Ground Flash Density*, GFD) es uno de los parámetros más relevantes, toda vez que permite medir la verdadera distribución espacial del fenómeno. Hoy, gracias a diversas investigaciones, especialmente a través de misiones espaciales de la NASA, se sabe con certeza que en el mundo hay lugares con mayores valores de este parámetro, especialmente en la zona tropical continental (Cecil, *et al.*, 2014), y sitios puntales o *hotspots* de altísima actividad eléctrica atmosférica (Albrecht, *et al.*, 2016).

Resultados y discusión

Los primeros resultados del análisis sistemático de la información proveniente de las redes de localización de rayos en Colombia fueron presentados por Younes & Torres (2002) cuando ya la primera red colombiana de localización de rayos (RECMA) llevaba cinco años de funcionamiento. Así se recopilieron las evidencias necesarias para ratificar la hipótesis de la variación espacial y temporal de los parámetros del rayo y su mayor incidencia en la zona tropical. En aquel momento se pudieron hacer análisis estadísticos basados en la información emanada de la red.

Los primeros análisis se relacionaban con la variación espacial y en ellos se dividieron las áreas de análisis de la información en una retícula acorde con el desempeño de las redes en cuanto a la exactitud de la localización (LA). La figura 2 (izquierda) muestra los valores de densidad de las descargas a tierra (*Ground Stroke Density*, GSD) en el área de mayor actividad detectada por la red entre 1997 y 2002. Como puede observarse, este parámetro de densidad está fuertemente asociado al área de análisis, lo que evidencia la necesidad de tener redes con una mejor LA y hacer análisis que permitieran incluir las incertidumbres generadas por los errores en la localización. En esa época ya se observaba la variación espacial de los parámetros del rayo, confirmada posteriormente por Albrecht, *et al.* (2016) mediante el análisis de cerca de 20 años de datos de los sistemas de detección de rayos satelitales.

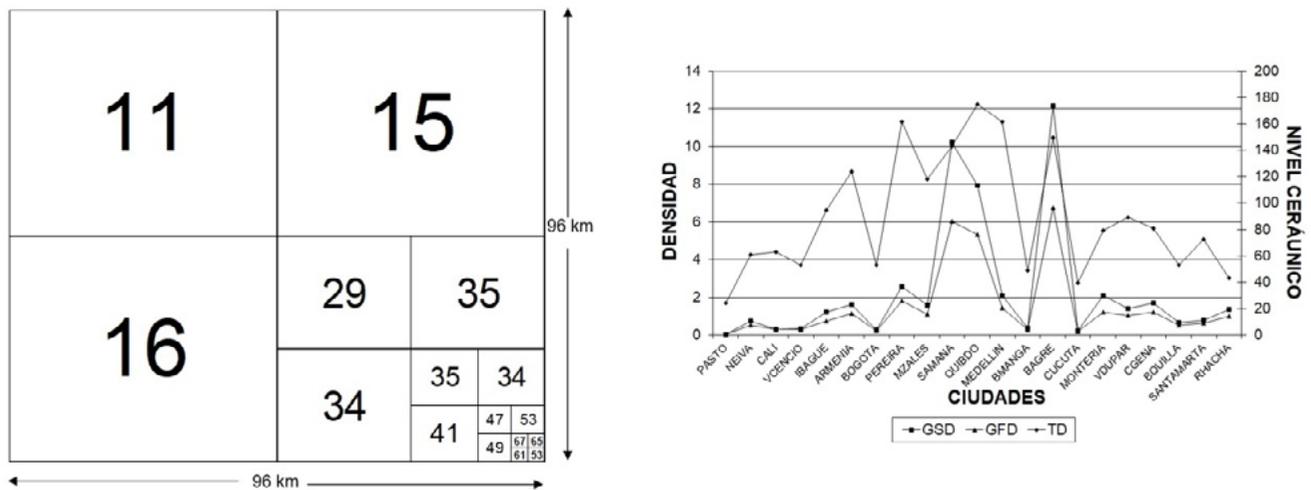


Figura 2. Densidad de las descargas a tierra (GSD), densidad de descargas a tierra de *flashes* (GFD) y nivel cerámico (TD) en diversas ciudades de Colombia distribuidas de sur a norte, 1997-2002 (derecha)

Para verificar la variación espacial de los parámetros asociados con la frecuencia y la densidad de la actividad eléctrica atmosférica (densidad tanto de descargas como de *flashes* y nivel cerámico), se hicieron otros análisis como el de la **figura 2** (derecha). Allí se observa que, al desplazarse de sur a norte a lo largo de diferentes ciudades en el territorio colombiano, los valores de dichos parámetros varían considerablemente.

Dada la importancia que tienen los dos parámetros (densidad de descargas a tierra y nivel cerámico), a nivel internacional se acepta el uso de ecuaciones que los relacionen. Con base en los resultados obtenidos por **Younes & Torres (2002)**, se propuso la ecuación (1), la cual relaciona estos parámetros para emplearlos en la zona tropical, donde N_g es la densidad de descargas a tierra en *flashes*/km²/año y T_d es el número de días tormentosos por año. Esta ecuación se incorporó en las normas internacionales (**IEEE, 2011**) y es más apropiada para el caso colombiano que, como se ha mencionado anteriormente, tiene características especiales desde el punto de vista orográfico y meteorológico, así como una alta actividad eléctrica atmosférica.

$$N_g = 0.0017 T_d^{1.56} [\textit{flashes}/\textit{km}^2/\textit{año}] \quad (1).$$

Los resultados obtenidos en el 2002 en Colombia en cuanto a la caracterización de los parámetros del rayo hacían necesario analizar el desempeño de las redes de localización para determinar si, efectivamente, los valores sorprendentemente altos de densidad de descargas a tierra (que para la época no se habían reportado en la literatura científica internacional), eran correctos. Como no había otras redes de localización disponibles en el territorio colombiano, con la ayuda de la NASA y la información de dos misiones espaciales que emplearon sendos dispositivos de detección de rayos basados en la información y el procesamiento de imágenes OTD (*Optical Transient Detector*) y LIS (*Lightning Imaging Sensor*), se desarrolló una metodología utilizando series de tiempo para correlacionar y validar el sistema terrestre de localización de rayos que operaba entonces (**Younes, et al., 2002; Younes, et al., 2003**).

Los resultados mostraron que ambas series de tiempo se correlacionaban mutuamente y que la eficiencia de la red terrestre para la detección de los datos permitía afirmar que, efectivamente, eran confiables según las metodologías estadísticas utilizadas.

Con base en los datos suministrados por la red de localización que funcionaba en el 2002 y las misiones OTD y LIS, se pudieron elaborar mapas de densidad de descargas a tierra, con el fin de determinar el comportamiento espacial de dicho fenómeno con sistemas confiables.

Como puede observarse en la **figura 3**, los mapas concuerdan en cuanto a su distribución espacial, con los mayores valores en las regiones del Bajo Cauca antioqueño y el Catatumbo colombo-venezolano. Las diferencias se deben a la eficiencia en la detección de la red terrestre. En estudios posteriores de **Albrecht, et al. (2016)** y **Aranguren, et al. (2016)** se evidenció que los resultados obtenidos en el 2002 eran acertados.

Una vez determinado el comportamiento de la densidad de descargas a tierra, el cual mostraba su mayor actividad en lugares muy específicos del territorio colombiano, se procedió analizarlo más en detalle.

Como se aprecia en la **figura 4**, el comportamiento del fenómeno varía mucho en distancias muy cortas de solo algunas decenas de kilómetros. Este comportamiento es extraño en un fenómeno natural, pues se espera que no haya variaciones tan fuertes. La hipótesis era que se debía a la forma de definir el parámetro de densidad de descargas a tierra a partir de la información de las redes de localización. En general, los análisis de datos, especialmente los provenientes de las redes de localización, excluyen incertidumbres generadas en la información que debe tenerse en cuenta para analizar este tipo de fenómenos.

El diferenciar en áreas pequeñas el territorio y contar el número de impactos detectados por la red sin tener en cuenta que la exactitud en la localización se basa en algoritmos que no necesariamente son funcionales en territorios con una orografía como la colombiana, se hacía necesario empezar a incorporar dichas incertidumbres en el análisis mediante estrategias metodológicas.

Se encontró que la teoría de subconjuntos difusos podía ser útil para considerar, no solamente los rayos que impactaban una zona, sino también aquellos de zonas aledañas con un factor o peso menor, de manera que se minimizaban los errores generados por la incertidumbre de la exactitud en la detección de la red.

Cuando se toman los datos de las celdas sin tener en cuenta estos problemas, se obtienen mapas tridimensionales como los de la **figura 5** (izquierda), que en la teoría de subconjuntos difusos se definen como de densidad *crisp*.

Como puede observarse, es evidente que el comportamiento no es uniforme ni continuo, lo cual es ajeno al que se espera en los fenómenos naturales en un espacio territorial determinado. Aplicando la teoría de subconjuntos difusos, ampliamente explicada en **Younes, et al. (2011)** y **Younes, et al. (2006)**, es posible generar superficies que incluyan información proveniente de celdas aledañas mediante funciones de pertenencia trapezoidales.

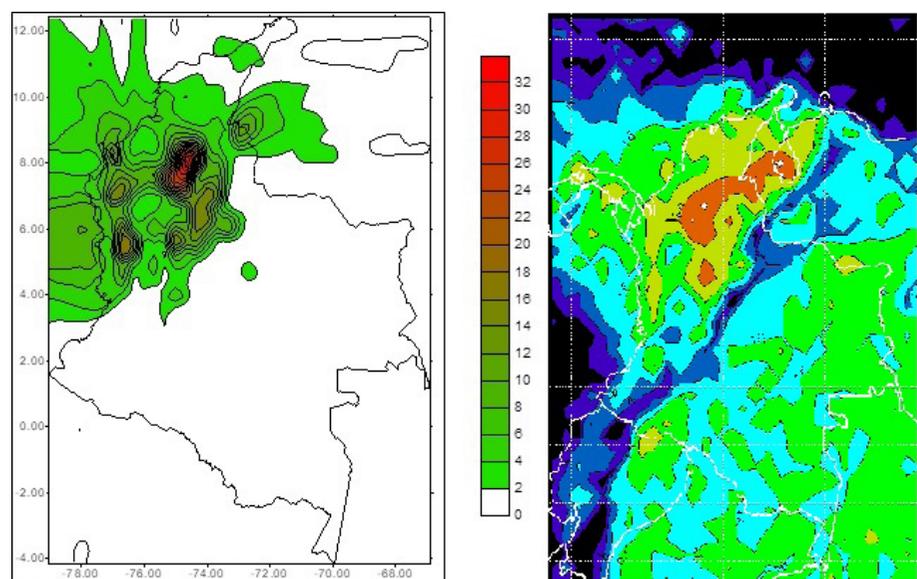


Figura 3. Mapas con los datos recolectados en las redes de detección de rayos entre 1997 y 2002. Izquierda: red de localización de rayos terrestre. Derecha: sistema de detección de rayos satelital

Una vez implementada la estrategia que conduce a lo que llamamos densidad difusa, se llega a resultados que se aproximan mucho mejor al comportamiento del fenómeno natural analizado. En la **figura 7** (derecha) se observa la misma superficie reportada en la izquierda después de aplicar el método computacional. Como se aprecia, en la misma región con alta densidad de rayos se encuentra un comportamiento que equivale a suavizar la superficie. Es importante resaltar que el método no busca suavizar superficies, sino que

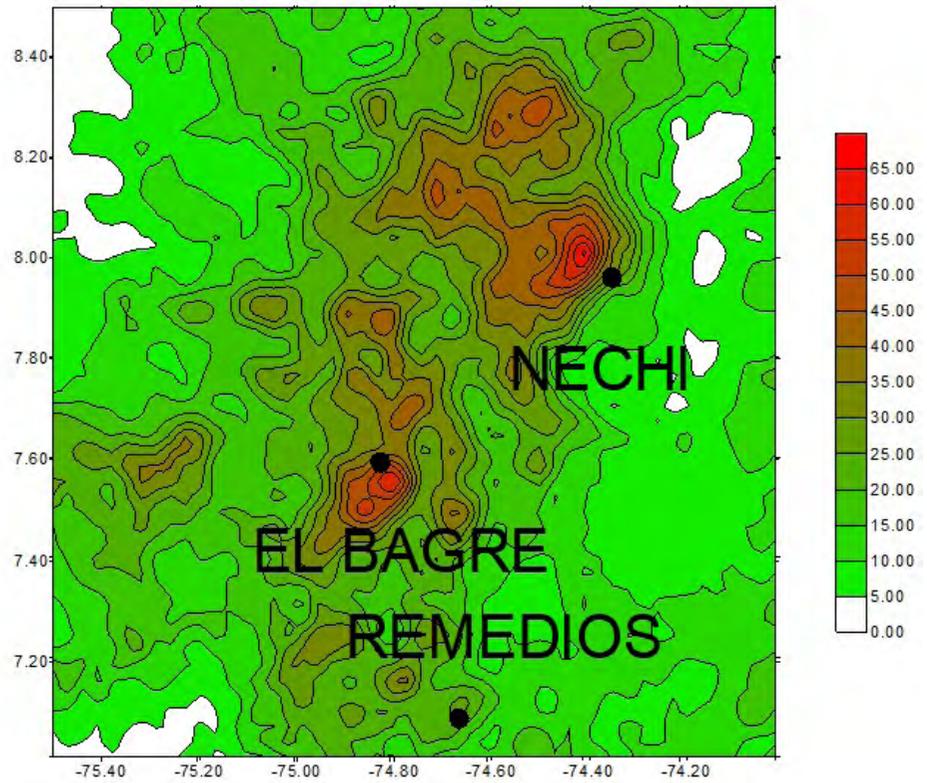


Figura 4. Mapa detallado de la densidad de descargas en la zona de mayor actividad de rayos detectada por la red terrestre en el 2002

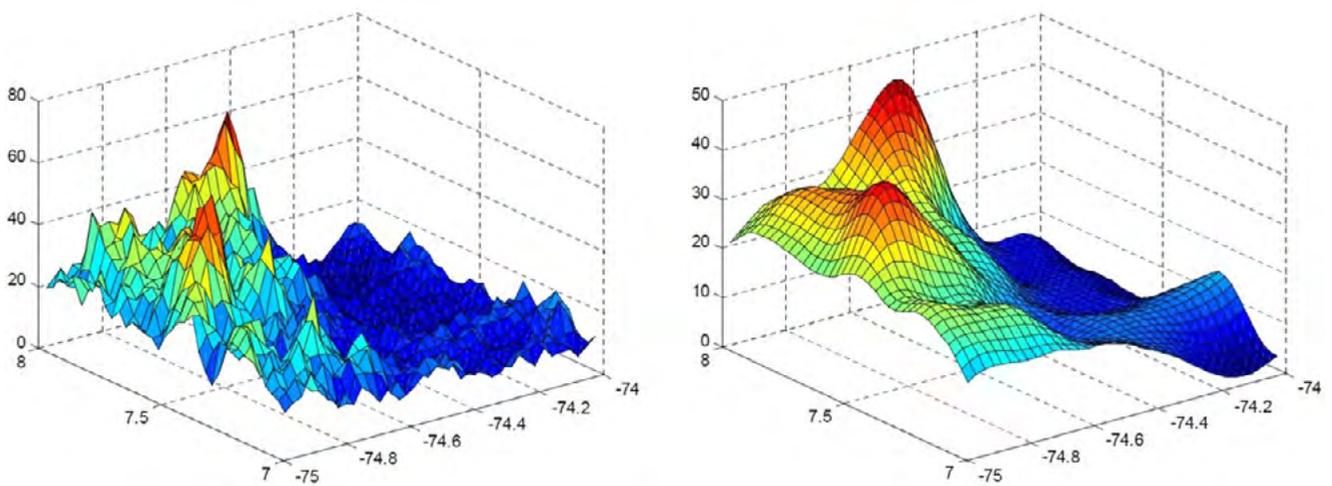


Figura 5. Mapa en tres dimensiones de la densidad de rayos a tierra en la zona de mayor actividad en Colombia. Izquierda: densidad *crisp*. Derecha: densidad difusa

incorpora información relevante en ciertas celdas que permiten un comportamiento más adecuado del fenómeno si se incluyen las incertidumbres propias del manejo de datos de las redes de localización de rayos.

La metodología arrojó buenos resultados en los casos descritos, especialmente donde las líneas de base de las redes son grandes y hay puntos focalizados de alta actividad eléctrica atmosférica, como en el caso colombiano, con errores de localización mayores que pueden incrementarse aun más por aspectos relacionados con la orografía, como se mostrará más adelante.

El estudio de los parámetros del rayo ha avanzado principalmente en los países de zonas templadas (altas o bajas), pero en la zona tropical hay pocas investigaciones relevantes; es el caso de Colombia, donde los estudios han buscado incorporar otros aspectos propios de la geografía nacional, como el efecto de las cadenas montañosas en la propagación de las ondas electromagnéticas radiadas por el fenómeno del rayo. En cuanto a las redes de localización, estas han sido calibradas en regiones con amplias zonas planas, donde la atenuación de los campos electromagnéticos es muy baja y se tiene mucho mejor desempeño de los sistemas de detección y localización de descargas eléctricas atmosféricas.

La situación particular de las regiones con alta actividad eléctrica atmosférica y cadenas montañosas con altitudes que van desde cero hasta 5.000 m s.n.m. es muy particular, lo que debe analizarse en el caso colombiano. Teniendo en cuenta que la actividad de rayos disminuye con la altitud, pues los picos máximos ocurren en las llamadas áreas de piedemonte, algunos estudios (Aranguren, *et al.*, 2016; Younes & Duarte, 2006) se han centrado en encontrar relaciones que permitan determinar los lugares con mayor actividad a partir de las condiciones geográficas propias de un territorio en zona tropical.

Younes & Duarte (2006) también analizaron otras relaciones con las características geológicas y meteorológicas del territorio colombiano y llegaron a las primeras conclusiones sobre la correlación entre diversos parámetros y los sistemas de medición mediante estrategias de minería de datos basadas en las reglas de asociación difusas.

La concentración de puntos de alta actividad eléctrica atmosférica y su variación temporal y espacial hizo necesario analizar los posibles efectos de la emisión de material en partículas, especialmente la antropogénica, para comprobar por primera vez en Colombia los efectos de fenómenos como las islas de calor y la polución en los parámetros del rayo.

Los resultados más importantes del análisis del efecto urbano y de la emisión de material en partículas en Bogotá hecho por Del Río, *et al.* (2017) y Del Río (2018) muestran que, aunque los picos de actividad eléctrica atmosférica coinciden con aquellos de las temporadas de lluvias de abril y octubre, hay altos niveles inesperados en diciembre, mes de baja precipitación y de polución moderada, lo que requiere continuar con el estudio de los efectos antropogénicos en la actividad eléctrica atmosférica y en los parámetros del rayo, específicamente.

Dada la orografía y alta actividad eléctrica atmosférica de Colombia, otro aspecto de gran relevancia en el marco de los estudios en el país es la necesidad de evaluar el efecto del relieve sobre la propagación de las ondas electromagnéticas radiadas por rayos y su implicación en las redes de localización.

Pulgarín (2020) analiza las simulaciones computacionales que permitieron por primera vez en Colombia evaluar el efecto del relieve sobre las ondas de baja y muy baja frecuencia, especialmente en el desempeño de los sistemas de localización de rayos. Esta es el primer estudio de evaluación del efecto del terreno desde una perspectiva de análisis numérico de onda completa con elevaciones montañosas tan altas como las de Colombia.

En la figura 6 (izquierda) se observa un mapa de Colombia con las cadenas montañosas y los puntos de simulación de impacto y medición de señales de rayos que atraviesan montañas de hasta 5.000 m s.n.m. Los círculos son los puntos de impacto y los triángulos los lugares de medición. Se pueden ver trayectorias como la que conecta los puntos L_A y S_C en la que hay elevaciones que alcanzan los 5.000 m s.n.m. En estas circunstancias, un rayo que impactara a tierra en la posición L_A tendría que sortear un obstáculo muy alto que,

dependiendo de las principales longitudes de onda eventualmente generadas por dicho fenómeno al descomponerse en el espectro electromagnético, podrían ser muy grandes y tener efectos fuertes de atenuación de la onda.

Para ello se hicieron simulaciones con el fin de comparar los efectos sin la atenuación generada por las irregularidades del terreno, es decir, en terreno plano, con aquellas generadas por el obstáculo. En la **figura 6** (derecha abajo) se muestran los resultados de dichas simulaciones. La línea continua es el resultado de la simulación en ausencia de obstáculo, es decir, en terreno plano. La línea punteada es el resultado del análisis en presencia del obstáculo.

En la **figura 6** (derecha arriba y abajo) se muestran los resultados en el caso en que el impacto del rayo se produce en el punto L_C y la medición se realiza a 55 km de distancia, en S_G . Como se observa, hay una atenuación importante, de casi el 50 %, en el campo eléctrico medido a la distancia mencionada. Para el caso del terreno plano, se hicieron dos análisis: el primero haciendo la medición a la misma altitud del punto de impacto y el segundo, sobre el terreno, lo cual no fue significativo para el proceso bajo análisis.

Los análisis de **Pulgarín (2020)** son muy importantes porque permiten verificar la importancia de considerar el tipo de terreno en el análisis de los parámetros del rayo en Colombia, especialmente en cuanto al desempeño de las redes de localización, aspecto también abordado por **Herrera & Younes (2020)** utilizando una plataforma experimental para la medición de los parámetros del rayo mediante la captura simultánea de las variables de campo magnético, campo eléctrico y video de alta velocidad, con el fin de contrastar dichas mediciones con el sistema de medición de rayos terrestre de la segunda red ya descrita y mejorar su desempeño, específicamente en lo relacionado con la eficiencia de la detección (DE), en la cual se puede subestimar el número de rayos detectados afectando, en consecuencia, el parámetro de multiplicidad.

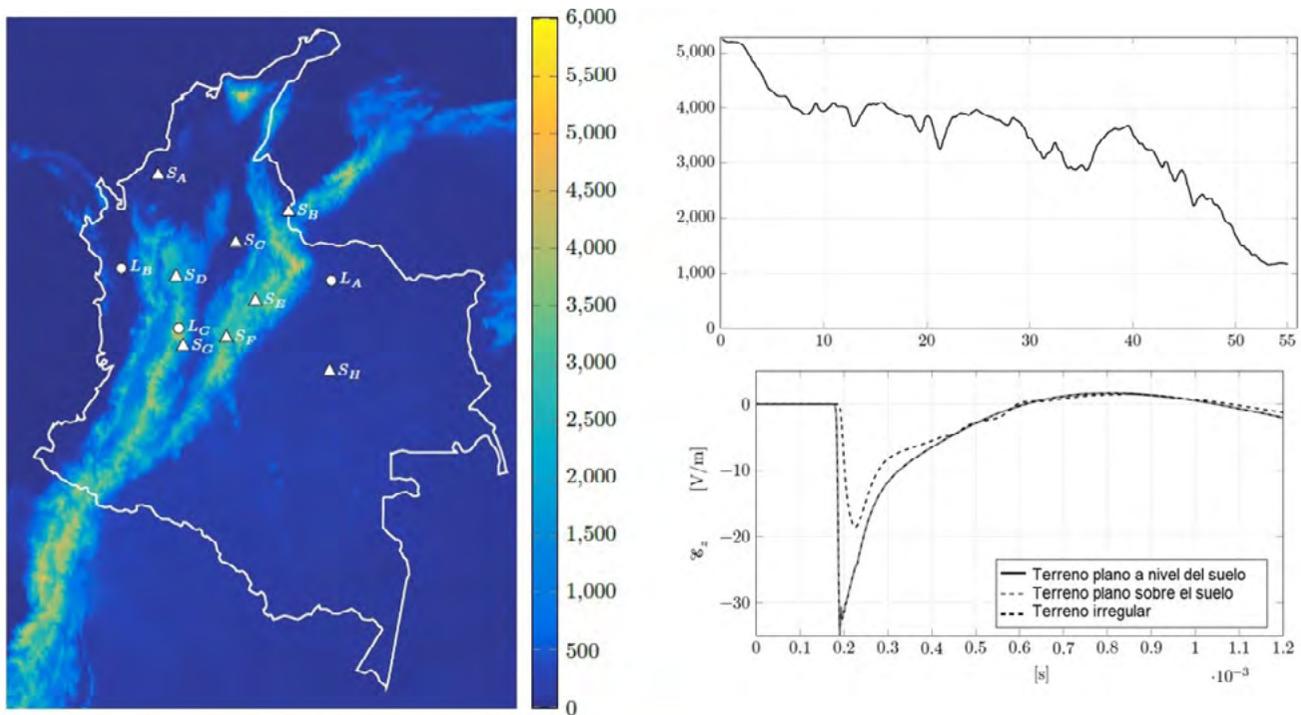


Figura 6. Izquierda: Mapa de elevación de las cadenas montañosas en Colombia con los puntos de impacto y medición de rayos simulados (escala en m s.n.m.). Derecha arriba: perfil de relieve de la simulación desde el punto de impacto L_C hasta el punto de medición S_G (eje vertical en m s.n.m., eje horizontal en km) (tomado de Google Earth Pro). Derecha abajo: campo eléctrico vertical medido después en el punto S_G , cuya fuente es el impacto del rayo L_C comparando terreno irregular y terreno plano (adaptado de **Pulgarín, 2020**).

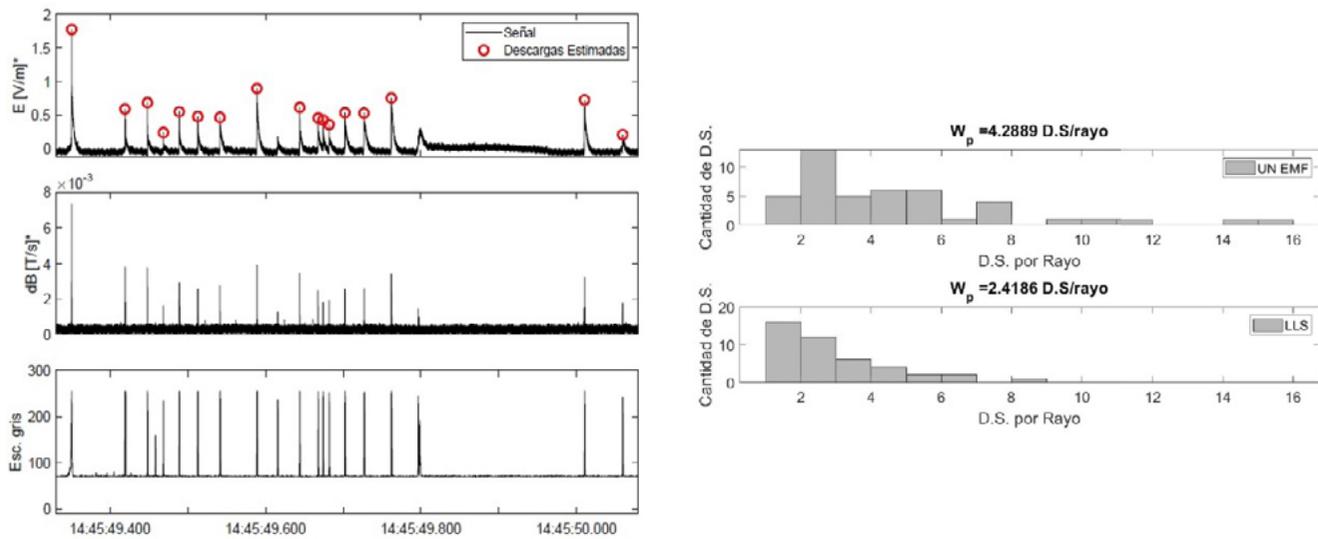


Figura 7. Derecha: mediciones simultáneas de un evento de rayo (descarga de retorno y descargas subsiguientes) en la región del Valle de Aburrá, Colombia, utilizando los parámetros de campo eléctrico (superior) y campo magnético (intermedia) y los registros tomados con video de alta velocidad (inferior). Izquierda: análisis de la multiplicidad de dos sistemas de medición. Plataforma local de medición con video incorporado (arriba). Sistema de localización de rayos (abajo) (adaptado de **Herrera & Younes, 2020**).

En la **figura 7** se presentan los registros simultáneos de un evento de rayo (descarga de retorno y descargas subsiguientes) de señales de campo eléctrico, campo magnético y registros tomados de video de alta velocidad en una zona del Valle de Aburrá (Colombia). Con estos registros fue posible determinar con mucha mayor exactitud la cantidad de descargas de cientos de eventos de rayos en la zona de estudio, ya que se tenían los registros de video.

Con base en el análisis de todos los eventos, se pudo establecer una primera apreciación certera de la eficiencia de la detección de la red de localización de rayos en Colombia, pues se tenían indicios de subestimación de la cantidad de rayos detectados. En la **figura 7** (derecha) se presentan los resultados de la comparación del número de descargas subsiguientes por rayo, tanto para el sistema experimental con video incorporado, como para la red de localización de rayos, con base en cerca de 10 mil mediciones. Como puede observarse, la multiplicidad determinada por el sistema de localización de rayos es mucho menor. El cálculo final refleja una eficiencia en la detección del 53 %, lo que está ampliamente explicado en **Herrera & Younes (2020)**.

Conclusiones

Durante los últimos 20 años el autor ha estudiado el fenómeno del rayo, su caracterización y sus efectos en Colombia. Desde el inicio, la investigación evidenció que las características espaciales y temporales de los parámetros de este fenómeno natural ratificaban la hipótesis planteada por **Torres (1998)**. Desde comienzos del presente siglo ha quedado establecido que Colombia cuenta con lugares de altísima actividad eléctrica atmosférica ubicados en puntos específicos de su geografía. Esta circunstancia, ya planteada en varios estudios de una década atrás con base en los mapas de los niveles isoceráunicos, fue comprobada con mayor certeza a partir del análisis de los datos de los sistemas de información provenientes de las primeras redes de localización de rayos en el país y ratificada por las misiones espaciales de la NASA mediante la detección de rayos desde el espacio basada en el análisis de imágenes.

El uso de las bases de datos de los sistemas de localización de rayos exigió herramientas de computación flexibles, tales como la teoría de subconjuntos difusos y las reglas de asociación difusas, lo que facilitó la interpretación y adecuación de los datos a las realidades del fenómeno natural analizado, ratificando, a la vez, las características especiales de la actividad eléctrica atmosférica en Colombia.

El análisis de los parámetros del rayo a partir de los datos de las redes de localización se viene realizando en Colombia desde hace 20 años con aportes significativos que destacan las particularidades del fenómeno a la luz de las realidades geográficas, orográficas y meteorológicas de un país ubicado en zona tropical.

Los efectos del terreno, especialmente de los altos gradientes de altitud, así como de las variables meteorológicas del territorio colombiano, incentivó el estudio, por primera vez en el mundo, de los efectos de la propagación de las ondas electromagnéticas generadas por el rayo en el desempeño de los sistemas de localización del fenómeno en cuanto a la eficiencia de la detección y la exactitud de la localización.

La eficiencia de los sistemas de localización de rayos ha permitido el desarrollo de herramientas para contrastar el desempeño de las grandes redes de localización y ha aportado al conocimiento de parámetros del rayo como la multiplicidad real y la densidad de rayos a tierra en algunos lugares del territorio colombiano.

Los primeros análisis de los efectos antropogénicos, especialmente los derivados de las emisiones de material en partículas, y su relación con el incremento de la actividad de rayos en ciertas zonas del territorio colombiano requieren de estudios más profundos para ser concluyentes.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Nacional de Colombia y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (anteriormente Colciencias) por la financiación de la totalidad de las investigaciones que se reportan en el presente artículo, así como a Intercolombia S.A. E.S.P y a Keraunos S.A.S. por la colaboración prestada en el suministro de los datos de las redes de localización de rayos.

Conflicto de intereses

El autor no tiene conflicto de intereses.

Referencias

- Abarca, S. F., Corbosiero, K. L., Galarneau Jr, T. J.** (2010). An evaluation of the worldwide lightning location network (WWLLN) using the national lightning detection network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **115** (D18): 1-11.
- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., Christian, H. J.** (2016). Where are the lightning hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. **97** (11): 2051-2068.
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J.C., Torres, H., Betz, H.** (2016). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. **154**: 182-189.
- Boccippio, D. J., E. R. Williams, S. J. Heckman, W. A. Lyons, I. Baker, R. Boldi.** (1995). Sprites, ELF transients and positive ground strokes, *Science*. **269**: 1088.
- Boccippio, D. J., Koshak, W., Blakeslee, R., Driscoll, K., Mach, D., Buechler, D., Goodman, S. J.** (2000). The Optical Transient Detector (OTD): Instrument characteristics and cross-sensor validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. **17** (4): 441-458.
- Boccippio, D. J., Koshak, W.J., Blakeslee, R.J.** (2002) Performance assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor. Part I: Predicted Diurnal Variability. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*. **19.2**: 1318.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J.** (2014). Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description. *Atmospheric Research*. **135**: 404-414.
- Cruz-Bernal, A. S., Torres-Sánchez, H., Aranguren-Fino, H., Inampué-Borda, J. C.** (2018). Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997–2014. *Revista UIS Ingenierías*. **17** (2): 65-74.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).** (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018–Colombia. Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018/cuantos-somos>

- Del Río-Trujillo, D., Younes-Velosa, C., Pulgarín-Rivera, J.** (2017). Lightning activity over large cities located in mountainous tropical zones and its relationship with particulate matter PM10 distribution-the Bogota City Case. *Revista Facultad De Ingeniería-Universidad de Antioquia*. **82**: 22-30.
- Del Río-Trujillo, D. F.** (2018) Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano (Disertación doctoral, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).
- Diendorfer, G., Bernardi, M., Cummins, K. L., Del la Rosa, F., Hermoso, B., Hussein, A. M., Torres, H.** (2009). Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Location Systems-The Effects of system Performance. Review of CIGRE Report. p. 1-5.
- Franklin, B.** (1774). Experiments and observations on electricity made at Philadelphia. London. E Cave.
- Herrera, J., Younes, C., Porras, L.** (2018). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data. *Atmospheric Research*. **203**: 164-174.
- Herrera, J. & Younes, C.** (2020). Plataforma experimental para la medición sistemática de parámetros de descargas eléctricas atmosféricas (p. 1-106). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. <http://www.hermes.unal.edu.co>
- IEEE.** (2011) Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, en IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004). pp.1-73, Doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5706451
- Karami, H., Mostajabi, A., Azadifar, M., Wang, Z., Rubinstein, M., Rachidi, F.** (2019). Locating Lightning Using Electromagnetic Time Reversal: Application of the Minimum Entropy Criterion. In 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA) (pp. 1-4). IEEE.
- Karami, H., Azadifar, M., Mostajabi, A., Rubinstein, M., Rachidi, F.** (2019). Numerical and Experimental Validation of Electromagnetic Time Reversal for Geolocation of Lightning Strikes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. **62** (5): 2156-2163. Access date: October 12, 2020, doi: 10.1109/TEMPC.2019.2957531.
- Koshak, W. J., Cummins, K. L., Buechler, D. E., Vant-Hull, B., Blakeslee, R. J., Williams, E. R., Peterson, H. S.** (2015). Variability of CONUS lightning in 2003–12 and associated impacts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **54** (1): 15-41.
- Lyons, W. A. & Williams, E. R.** (1993). Preliminary investigations of the phenomenology of cloud-to-stratosphere lightning discharges. Conference on atmospheric electricity, St. Louis, Missouri.
- Lyons, W. A.** (1996). Sprite observations above the US High Plains in relation to their parent thunderstorm systems. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. **101** (D23): 29641-29652.
- Mostajabi, A., Finney, D. L., Rubinstein, M., Rachidi, F.** (2019). Nowcasting lightning occurrence from commonly available meteorological parameters using machine learning techniques. *npj Climate and Atmospheric Science*. **2** (1): 1-15.
- Pérez, E., Espinosa, J., Aranguren, D.** (2020). On the development of dynamic stroke density for transmission line for power system operational applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. **116**: 105527.
- Pierce, E.T.** (1956). Some techniques for locating thunderstorms from a single observing station. In *Vistas in Astronomy*, ed. A. Beer, vol. 2, pp. 850–5. London and New York: Pergamon Press.
- Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A., Naccarato, K. P.** (2007). Maximum cloud-to-ground lightning flash densities observed by lightning location systems in the tropical region: A review. *Atmospheric Research*. **84** (3): 189-200.
- Pulgarín, J.D.** (2020). Propagation of LF and VLF lightning electromagnetic waves: The ground effects. Applications to lightning locating systems in mountainous regions. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia).
- Rakov, V. A. & Uman, M. A.** (2003). *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press.
- Rakov, V. A. & Huffines, G. R.** (2003). Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. *Journal of Applied Meteorology*. **42** (10): 1455-1462.
- Rojas, H. E., Santamaría, F., Escobar, O. F., Román, F. J.** (2017). Lightning research in Colombia: lightning parameters, protection systems, risk assessment and warning systems. *Ingeniería y Desarrollo*. **35** (1): 240-261.
- Soto, E. & Pérez, E.** (2019). Lightning-induced voltages on overhead lines over irregular terrains. *Electric Power Systems Research*. **176**: 105941.

- Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Rison, W., Hamlin, T., Boccippio, D. J., Goodman, S. J., Christian, H. J.** (2000). Comparison of ground-based 3-dimensional lightning mapping observations with satellite-based LIS observations in Oklahoma. *Geophysical research letters*. **27** (12): 1703-1706.
- Torres, H.** (1998). Espacio y tiempo en los parámetros del rayo, ensayo sobre una hipótesis de investigación. Trabajo de investigación presentado a la Universidad Nacional de Colombia para promoción a la categoría de Profesor Titular. Bogotá.
- Torres, H.** (2015). El rayo en el trópico: certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo. Universidad Nacional de Colombia, Rectoría. Bogotá. p. 201.
- Torres, H., Pérez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J.** (2015). Contribution to lightning parameters study based on some American Tropical Regions observations. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. **8** (8): 4086-4093.
- Torres-Sánchez, H.** (2017). The interdisciplinarity of lightning. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **41** (159): 174-186.
- Van der Velde, O. A., Montanyà, J., López, J. A., Cummer, S. A.** (2019). Gigantic jet discharges evolve stepwise through the middle atmosphere. *Nature communications*. **10** (1): 1-10.
- Wilson, C.T.R.** (1920). Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **221**: 73-115.
- Younes, C., & Torres, H.** (2002). Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá. p. 173.
- Younes, C., Torres, H., Perez, E., Gallego, L., Montana, J., Herrera, J., & Vargas, M.** (2003). A comparison between satellital and terrestrial lightning detection systems. In *Proceedings of ISH*.
- Younes, C. & Duarte, O.** (2006). Metodologías para la correlación de parámetros del rayo con características geográficas y meteorológicas, caso colombiano (Disertación doctoral, Ph. D., Universidad Nacional de Colombia).
- Younes, C., Duarte, O., Pulgarín, J.** (2013). A novel fuzzy parameter for ground flash density. *Dyna*. **80** (182): 41-49.
- Younes, C., Torres, H., Pérez, E., Gallego, L., Cajamarca, G., Pavas, A.** (2004). Lightning parameters evaluation in the Colombian highest atmospheric activity zone. In *Proceedings of ICLP*. p. 143.
- Zhang, D., Cummins, K. L., Nag, A., Murphy, M., Bitzer, P.** (2016). Evaluation of the National Lightning Detection Network Upgrade Using the Lightning Imaging Sensor. In *24th Int. Lightning Detection Conf. & Sixth Int. Lightning Meteor. Conf.*
- Zhang, D., Cummins, K. L., Bitzer, P., Koshak, W. J.** (2019). Evaluation of the performance characteristics of the Lightning Imaging Sensor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. **36** (6): 1015-1031.