

Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016

Lightning Activity in the Department of Santander between 2014 and 2016

Brandon Steven Ardila*¹, **Edison Andrés Soto**¹, **Kevin Alberto Velandia**¹

¹Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia)

correspondence e-mail: brandon2208141@correo.uis.edu.co - easotor@uis.edu.co

Recibido: 08/04/2021. Modificado: 24/08/2021. Aceptado: 08/09/2021.

Abstract

Context: In this paper, the ground flash density (GFD) parameter in Santander (Colombia) is determined, and a study of lightning activity in the department from 2014 to 2016 is conducted.

Method: The departmental territory was divided into 1 km² squares, and, through data regarding cloud-to-ground discharges obtained from the Colombian Total Lightning Detection Network (LINET), the number of annual average flashes per square was found, which corresponds to the GFD parameter. Likewise, using statistical methods, the spatial and temporal variation, multiplicity, and peak return discharge current of the flashes that affected the department were analyzed.

Results: The areas with the highest GFD values are located in the municipalities of Suaita, Gámbita, Bolívar, Oiba, and Charalá. On average, 183.199 annual flashes were recorded, out of which 54,14 % have a multiplicity equal to one. Lightning activity peaks were observed in the months of April, May, September, and October between 16:00 and 18:00 and between 22:00 and 4:00 h, as well as mean annual current values of 33,6 kA for negative discharges with average maximum values in the months of October, November, and December, and of 25,7 kA for positive discharges with average maximum values in the months of April, October, and November.

Conclusions: A marked influence of the terrain's topography and altitude was found on the incidence of atmospheric discharges in the department, given that the municipalities with the highest lightning activity are located on the sides of high mountain ranges at altitudes less than 1.500 m.a.s.l., and the municipalities with less activity are located on moors and hills at heights between 3.000 and 3.500 m.a.s.l.

Keywords: lightning activity, ground flash density, flashes, LINET network

Acknowledgements: We would like to thank the Keraunos company for supplying data from the Colombian network for Total Lightning Detection with LINET technology, through which the analysis of lightning activity in Santander was carried out; and Dr. Diego del Río for supplying the script to determine the multiplicity of lightning events and additional contributions for the development of this article.

Language: Spanish

Open access



Cite this paper as: Ardila, B., Soto, E., Velandia, K.: Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. INGENIERÍA, Vol. 26, Num. 3, 2021. 419:435.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17585>

Resumen

Contexto: En este artículo se determinó el parámetro de densidad de descargas a tierra (DDT) en Santander (Colombia) y se hizo un estudio de la actividad de rayos en el departamento entre 2014 y 2016.

Método: El territorio departamental se dividió en recuadros de 1 km² y, mediante información de descargas a tierra obtenida de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET, se halló la cantidad de *flashes* promedio anuales por recuadro, lo que corresponde al parámetro de DDT. Así mismo, usando métodos estadísticos, se analizó la variación espacial, temporal, multiplicidad y corriente pico de descarga de retorno de los *flashes* que incidieron en el departamento.

Resultados: Las zonas con mayores valores de DDT se ubican en los municipios de Suaita, Gámbita, Bolívar, Oiba y Charalá. En promedio, se registraron 183.199 *flashes* anuales, de los cuales el 54,14 % tiene multiplicidad igual a uno. Se observaron picos de actividad de rayos en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre entre las 16:00 y las 18:00 y las 22:00 y las 4:00, así como valores de corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de octubre, noviembre y diciembre, y de 25,7 kA para descargas positivas con valores máximos promedio en los meses de abril, octubre y noviembre.

Conclusiones: Se encontró una marcada influencia de la topografía y de la altitud del terreno en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de altas cadenas montañosas a alturas menores que 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm.

Palabras clave: actividad de rayos, densidad de descargas a tierra, descargas atmosféricas, red LINET

Agradecimientos: A la empresa Keraunos por el suministro de datos de la red Colombiana de Detección Total de Rayos con Tecnología LINET mediante los cuales se realizaron los análisis de la actividad de rayos en Santander. Al Dr. Diego del Rio por suministrar el script para determinar la multiplicidad de los eventos de rayo y aportes adicionales para el desarrollo de este artículo.

Idioma: Español

1. Introducción

El rayo es un fenómeno electromagnético que puede afectar los sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y el transporte, ocasionando pérdidas económicas, de bienes culturales, servicios públicos y vidas humanas [1], [2]. Estudios realizados han mostrado que los lugares de mayor ocurrencia del fenómeno del rayo en el mundo están ubicados en la zona tropical [3]–[7]. Así mismo se ha mostrado que la actividad eléctrica atmosférica es elevada comparada con latitudes templadas [8] y que los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente, muestra de ello es que la mediana de la corriente de descarga medida en zonas templadas alcanza los 30 kA [9], mientras que en regiones tropicales llega a 45 kA [10]. Investigaciones demuestran que siete de los diez lugares con mayor actividad de rayos en Suramérica están en Colombia, en donde su relieve y la convergencia de vientos favorecen la formación de tormentas [3], por lo que parámetros como la densidad de descargas a tierra (DDT) son de hasta 60 *flashes*/km²/año [6].

Para determinar el parámetro de densidad de descargas a tierra se han utilizado ecuaciones que lo relacionan con el nivel cerámico [2], el cual corresponde a la cantidad de días tormentosos al año. También se han empleado sistemas de localización de rayos LLS (por su sigla en inglés, Lightning

Location System), los cuales fueron implementados gracias al avance de los sistemas electrónicos. Estos sistemas capturan las señales electromagnéticas emitidas por el rayo y determinan la ubicación a través de diferentes algoritmos que relacionan al menos tres sensores que han detectado la señal, permitiendo determinar la ubicación espaciotemporal de la descarga [11].

En 1997 se instaló el primer LLS en Colombia, conocido como Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas - RECMA [1]. La RECMA estuvo en operación durante el periodo de 1997 a 2001, y estaba conformada por seis sensores LPATS (Lightning Position and Tracking System), que se instalaron en el territorio colombiano en lugares estratégicos con el fin de dar cubrimiento a la red de transmisión propiedad de la empresa ISA (Interconexión Eléctrica S.A.). Esta red detectaba rayos tipo nube-tierra (CG - Cloud to Ground) entregando datos de día, mes, año, minuto, segundo, milisegundo, latitud, longitud y corriente de cada *stroke* detectado por la red [1], [12].

Con base en los registros de la RECMA se pudo realizar una primera caracterización del fenómeno, permitiendo obtener la variación espaciotemporal de parámetros como DDT, polaridad, multiplicidad y valores de corriente pico en el territorio colombiano [13]. Uno de los resultados relevantes fue que zonas como la del Magdalena Medio presentaban mayor actividad eléctrica atmosférica y que en algunas como la sabana de Bogotá la actividad no era tan alta. La DDT obtenida con esta red en algunos lugares superaba los referentes internacionales que se tenían para el año 2002 [1], [13]. A pesar de los grandes aportes que se obtuvieron a través de la RECMA, esta presentaba algunas limitaciones en la localización de las descargas, debido a que algunos sensores se encontraban alineados [1].

Luego, en el año 2007, la red fue actualizada con los sensores LS7001 (por su sigla en inglés, LS - Lightning Sensor) y se convirtió en el Sistema de Información de Descargas Atmosféricas - SID [7]. Esta red estaba en la capacidad de detectar rayos tipo CG y estuvo en operación hasta el año 2016. En el año 2011 entró en operación la Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET propiedad de la empresa Keraunos E.S.P., la cual permite detectar rayos nube-tierra e intra-nube. Desde su instalación en septiembre de 2011 hasta finales de 2018 la red detectó más de 64.000.000 de descargas [14].

La actividad de rayos en Colombia se ha presentado a través de mapas, inicialmente en 1974 se elaboró el primer mapa de nivel isoceraúnico realizado por el HIMAT (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, actualmente IDEAM). Luego, en 1990, se realizó una actualización teniendo en cuenta los promedios aritméticos multianuales entre 1974 y 1988 [1]. Posteriormente, con la entrada en operación de los LLS, se han elaborado distintos mapas de DDT, en el 2002 el trabajo realizado por Younes presenta un mapa de DDT del área de mayor eficiencia de detección de la RECMA. En la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008 se actualizaron el mapa de niveles isoceraúnicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país con base en la información de la RECMA.

Después, en la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008 se actualizó el mapa de niveles isoceraúnicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país. Trabajos posteriores presentaron un mapa nacional de DDT para 2012, usando áreas de 3×3 km

en donde se ubicaron las zonas más activas en cuanto a rayos, que corresponden al Valle del río Magdalena y al Catatumbo [15]. En 2014 se actualiza el mapa para 2012 y 2013 usando la misma resolución espacial y se relaciona el cambio de este parámetro con la altitud [4]. En 2018 se publicó un estudio de 14 años de actividad de rayos en el periodo de 1997 a 2001 y de 2007 a 2015, en el cual se muestra la variación de parámetros como multiplicidad, polaridad, corriente pico de descarga de retorno y DDT [7].

En 2019 se presentó un mapa de DDT para regiones naturales de Colombia en el periodo entre 2012 y 2017 usando la misma dimensión de recuadros [16].

Conocer el valor de la densidad de descargas a tierra es de suma importancia para determinar el indicador de exposición al rayo en estructuras elevadas, con el fin de diseñar sistemas de protección óptimos y eficientes, y de esta manera disminuir el nivel de riesgo ante descargas atmosféricas. Así mismo, usar datos exactos de este parámetro es fundamental para garantizar la confiabilidad de líneas de transmisión y distribución, puesto que realizar diseños usando valores generalizados puede sobredimensionar los cálculos debido a la variación de la DDT con la altitud del terreno mostrada en [4].

Hasta el momento no se han realizado estudios en Santander (Colombia) que presenten la variación espacial y temporal de descargas atmosféricas ni se han caracterizado parámetros como la multiplicidad y la corriente pico de descarga de retorno. Tampoco se han realizado mapas de densidad de descargas a tierra usando recuadros de 1×1 km ni se ha explicado el comportamiento de este parámetro con base en la influencia de las cadenas montañosas del departamento. Teniendo en cuenta lo anterior, este artículo presenta un estudio sobre la actividad de rayos en el departamento de Santander entre los años 2014 y 2016, determinando los municipios con mayor y menor densidad de descargas a tierra promedio, el comportamiento mensual y el horario de los flashes registrados, así como la variación de la multiplicidad y de la corriente de descarga de retorno. Finalmente se presenta el mapa de DDT del departamento y se determinan los veinte sitios para los cuales este parámetro presenta los valores máximos.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio

El departamento de Santander está compuesto por 87 municipios y se encuentra ubicado en la zona noreste de Colombia formando parte de la región Andina, tiene aproximadamente 2.090.854 de habitantes (2018), siendo el séptimo departamento más poblado del país y el cuarto en cuanto a desarrollo económico. Su relieve se ve influenciado al oeste por el valle medio del río Magdalena y al este por la cordillera oriental con mesetas de gran extensión como Bucaramanga, Ruitoque, Berlín y Los Santos, y montañas de mediana elevación separadas del cuerpo de la cordillera que forman parte de la Serranía de los Yariguíes, así como montañas que superan los 4.000 msnm en donde se encuentran los páramos Anagá y El Almorzadero, este último con picos que llegan hasta los 4.500 msnm.

2.2. Datos y software

La información de descargas a tierra empleada en este estudio proviene de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET [17]–[20]. Esta red “Total Lightning” que opera en los rangos de frecuencia VLF/LF entrega para cada evento datos como fecha, hora, latitud, longitud, altura, tipo, corriente y error. LINET está compuesta por sensores que detectan el campo magnético generado por los impulsos electromagnéticos del rayo a través de un arreglo de dos antenas de lazo ortogonales entre sí. Esta red emplea la técnica de tiempo de arribo (por su sigla en inglés, TOA - Time of Arrival) para entregar los datos de posición de cada evento (Betz). El conjunto de datos que se empleó para realizar el análisis de la actividad de rayos del departamento de Santander corresponde a los eventos detectados entre 2014 y 2016. Se usó el software QGIS, que es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License, siendo un proyecto de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

2.3. Procesamiento

Con base en información de actividad de rayos brindada por la red LINET se ubicaron geográficamente las descargas (*strokes*) que incidieron en el recuadro que contiene al departamento de Santander (margen inferior izquierdo LA: 5.473958, LO: -74.653667; margen superior derecho LA: 8.622944, LO: -72.394531). Usando las herramientas de selección por localización se descartaron las descargas que impactaron fuera del recuadro y se logró individualizar la actividad dentro del departamento y en cada municipio de Santander para realizar un estudio más específico.

Se procesaron los *strokes* mediante un script desarrollado en [11], que permite agruparlos en flashes y asigna un valor de multiplicidad a cada evento de acuerdo con la cantidad de descargas subsecuentes que contenga (para que un conjunto de *strokes* formen parte de un flash deben estar separados en el espacio por distancias menores a 10 km y tiempos menores a 1 segundo entre el primer y segundo *stroke* y 500 m a partir del segundo). De esta forma se logra obtener una base de datos de los flashes en Santander, la cual se redujo a un tercio del tamaño original. En adelante la cantidad de rayos se medirá en flashes.

2.4. Determinación de la DDT

Ubicando los datos procesados de la red LINET, se encerró la superficie del departamento de Santander dentro de una cuadrícula donde cada recuadro tiene un área de 1km², según QGIS Santander tiene una extensión de 30.537 km². Se realizó el conteo de los flashes promedio anuales que inciden dentro de cada uno de estos recuadros con la opción *contar puntos en polígonos* de las herramientas de análisis de la pestaña vectorial del software; por motivos de la falta de visualización de los números dentro de cada uno de los pequeños recuadros se le dio un tono en una paleta de color espectral en la que los valores van desde 0 hasta 60 flashes dependiendo del año, para luego sacar un promedio entre los tres años de estudio.

3. Resultados

3.1. Variación espacial

La Tabla I muestra los municipios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander de acuerdo con el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio [15], el cual se calcula mediante el cociente flashes promedio / área del municipio y se interpreta como la cantidad de flashes anuales que se registrarían en cada kilómetro cuadrado del municipio si la totalidad de flashes incidentes en el mismo se distribuyeran de manera uniforme sobre su superficie. Este parámetro se halla con el único fin de realizar comparaciones en la actividad de rayos entre los municipios y no corresponde a la densidad de descargas a tierra que se hallará posteriormente, determinando el número de flashes anuales que impactan en un área de 1 km², es decir, un conteo de flashes por cada recuadro ubicado a lo largo del departamento [22].

Tabla I. Municipios con mayor actividad de rayos en Santander

Municipio	Flashes promedio	Área [km ²]	DDT promedio flashes/km ² /año
Bolívar	12.047	957,2	12,59
Cimitarra	373.123	3.165,6	11,79
Gámbita	6.856	606,7	11,30
Suaita	3.341	296	11,29
Oiba	3.210	285	11,26
La Belleza	2.726	259	10,52
Puerto Parra	7.427	745	9,97
Charalá	3.976	411	9,67
Barrancabermeja	11.146	1.154	9,66

Es así como municipios ubicados al oeste del departamento que limitan con el río Magdalena, como Bolívar, Cimitarra, Barrancabermeja y Puerto Parra, presentan una importante actividad de rayos. Lo anterior se puede explicar dado que estos municipios, como lo muestra la Figura 1, se encuentran al costado occidental de la Serranía de los Yariguíes o también llamada Cordillera de los Cobardes y estas montañas, que alcanzan alturas de hasta 3.475 msnm, actúan como barrera natural para los vientos húmedos y cálidos que circulan por la zona forzándolos a subir, lo que favorece la transferencia de carga por colisión entre partículas de hielo y granizo presentes en la atmósfera y por tanto la formación de tormentas eléctricas en los municipios nombrados, en los cuales la mayoría de su territorio se ubica a alturas menores a 150 msnm. Ese mismo efecto ocurre al costado oriental de dicha serranía, en donde municipios como Charalá, Suaita, Gámbita y Oiba, ubicados en una pequeña zona al suroriente del departamento que limita con Boyacá, muestran una importante actividad de rayos que también se ve afectada por el Páramo Carnicerías de Guanque, ubicado al oriente de los municipios nombrados y que alcanza alturas hasta de 4.170 msnm.

En la Tabla II se presentan los municipios con la menor actividad de rayos de acuerdo con la densidad de descargas a tierra promedio. Estos nueve municipios se ubican sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá a alturas que oscilan entre 3.000 y 3.500 msnm como se muestra en la Figura 1, de lo que se infiere la influencia de parámetros como la altitud en la

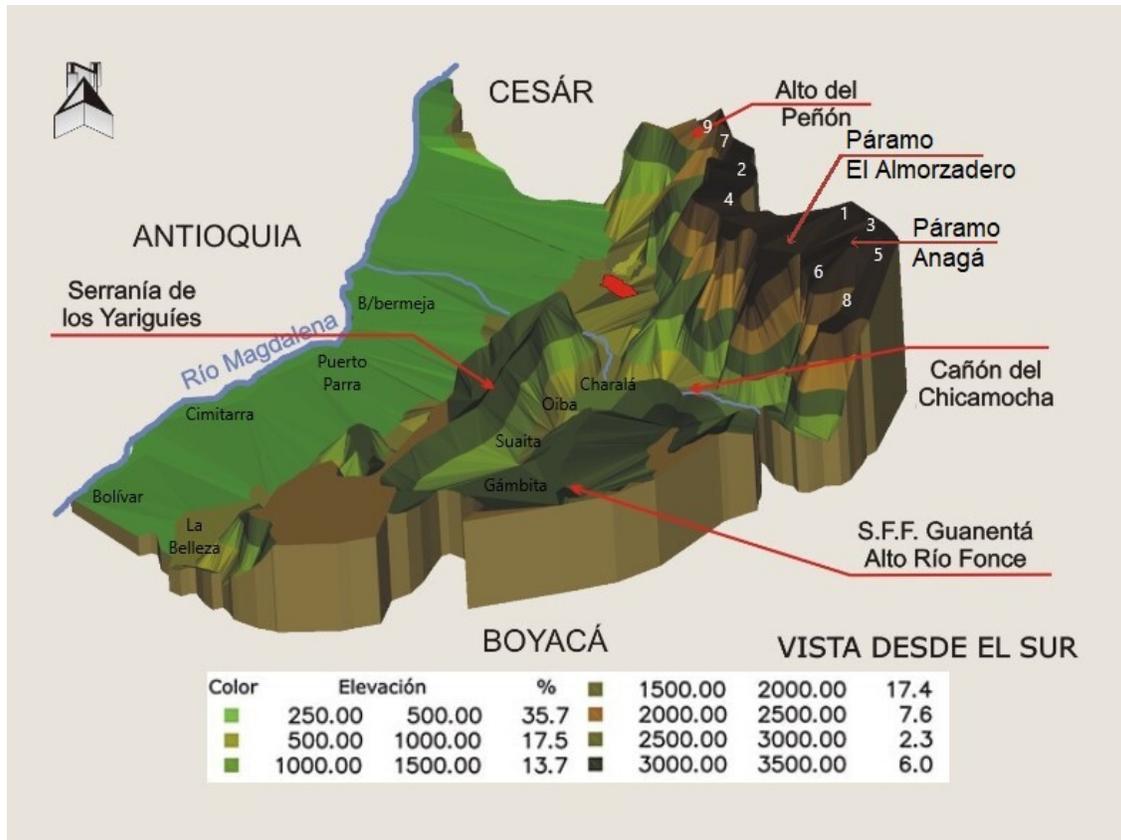


Figura 1. Relieve de Santander

Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia, Atlas de Colombia, IGAC, 2002

disminución de la cantidad de impactos de rayo en zonas que se ubican en relieves elevados. Esto se puede explicar porque en estas zonas, al ser páramos, no existen barreras naturales que permitan que el aire se eleve; además a mayor altitud, la presión atmosférica disminuye y por tanto el aire se expande, y disminuye su temperatura, lo que causa ambientes más fríos, en los cuales tiende a disminuir la formación de tormentas [15].

Tabla II. Municipios con menor actividad de rayos en Santander

Municipio	ID	Flashes promedio	Área [km ²]	DDT promedio flashes/km ² /año
Cerrito	1	88	416	0,21
Vetas	2	26	93	0,28
Concepción	3	141	333	0,42
Tona	4	158	342	0,46
Carcasí	5	132	259.8	0,51
Enciso	6	49	79	0,62
California	7	36	52,6	0,69
Capitanejo	8	57	81	0,70
Suratá	9	263	368	0,72

En general el área metropolitana de Bucaramanga, conformada por los municipios mostrados en la Tabla III, presenta una baja actividad de rayos, dado que se tiene en promedio entre 1,87 y 0,76 flashes/km²/año.

Tabla III. Actividad de rayos en los municipios del área metropolitana de Bucaramanga

Municipio	Flashes Promedio	Área [km ²]	DDT promedio flashes/km ² /a
Girón	889	745,1	1,87
Bucaramanga	167	162	1,03
Piedecuesta	408	481	0,85
Floridablanca	76	101	0,76

3.2. Variación temporal

La actividad de rayos en el departamento de Santander fue en promedio de 183.199 flashes por año, de los cuales el 76,5 % son de polaridad negativa y presentó un pico de 205.155 en 2015, aumentando un 20 % con respecto a 2014, año en el cual hubo 170.122. En 2016 se registraron 174.319 flashes y un crecimiento de la actividad del 2,5 % con respecto al primer año de estudio. La información anterior se observa en la Figura 2.

La Figura 3 muestra la incidencia de rayos por mes y el promedio mensual de los tres años de estudio, en donde se evidencia un comportamiento bimodal con valores máximos en abril, mayo, septiembre y octubre, de los cuales los tres primeros corresponden a los meses tormentosos del año en los que se registraron en promedio más de 23.000 flashes. Lo anterior es congruente con la actividad de rayos en regiones centrales del país estudiadas en [13]. El periodo de baja incidencia se presenta entre los meses de diciembre y enero con un promedio menor a 6.700 flashes.

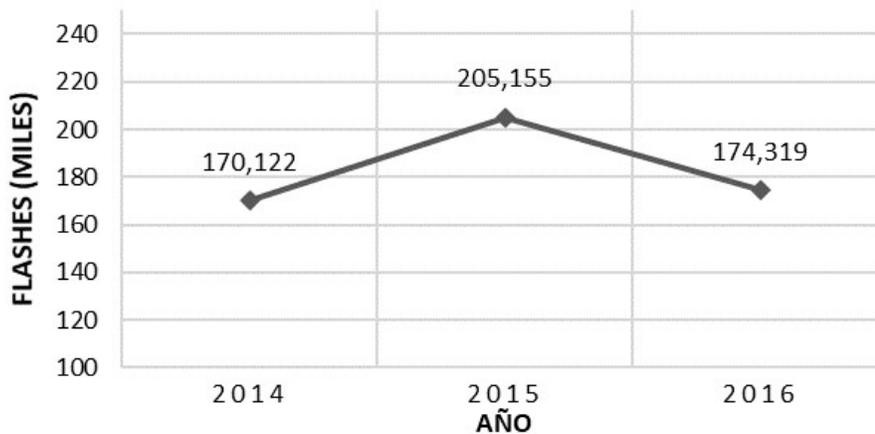


Figura 2. Comportamiento de la incidencia de flashes nube-tierra en Santander

Fuente: Elaboración propia.

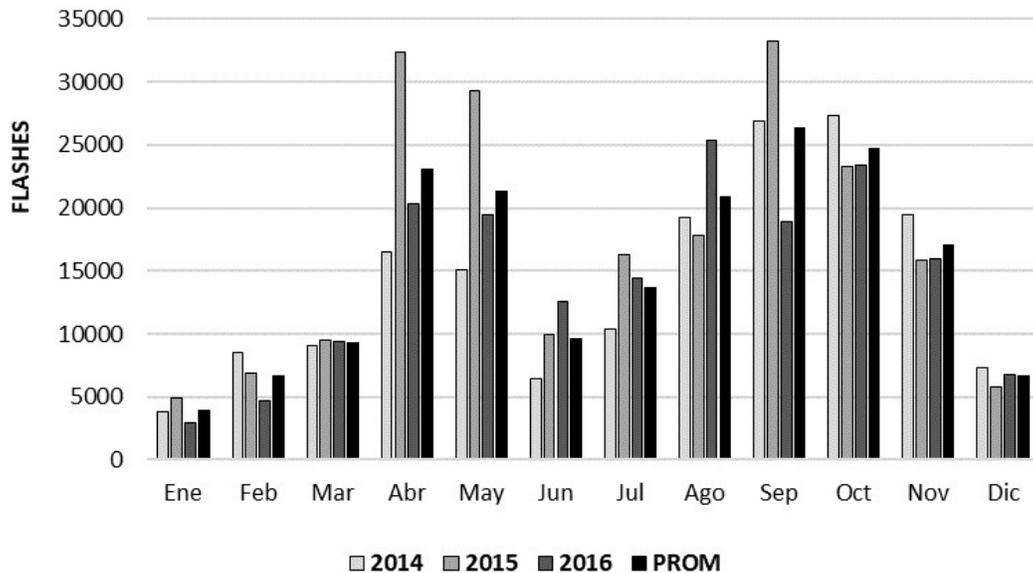


Figura 3. Cantidad de flashes nube-tierra por meses de 2014 a 2016

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la variación en la cantidad de flashes promedio según la hora local colombiana UTC-5. Se evidencian dos franjas de alta actividad, una de ellas entre las 16:00 y las 18:00 h cuando se registra un pico de 12.300 flashes, a las 17:00 h; la otra entre las 22:00 y las 4:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a la 1:00 h, lo anterior según [16] se presenta dado que en zonas montañosas puede haber tormentas de corta duración en horas de la tarde, las cuales en zonas de baja altitud se extienden hasta la madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes por hora.

3.3. Multiplicidad

La Figura 5 muestra el promedio de flashes anuales en función de su multiplicidad. El 54 % de los flashes anuales promedio tienen multiplicidad igual a uno, 17 % igual a dos, 9 % igual a tres y 6 % igual a cuatro. Solo un promedio de 1.559 flashes al año presenta más de diez descargas subsecuentes y un promedio de 25 flashes presenta más de veinte. La multiplicidad máxima en 2014 fue de 24, en 2015 de 41 y en 2016 de 32. En cuanto a la polaridad, se tiene que el 14 % de flashes negativos presenta más de cuatro descargas subsecuentes, mientras que solo el 6 % de los flashes positivos presenta esta misma característica.

3.4. Corriente pico de la descarga de retorno

La Figura 6 presenta la variación mensual de la corriente pico promedio de la descarga de retorno, para ello se tuvieron en cuenta corrientes pico de descargas positivas y negativas de más de 15 kA con el fin de tener resultados comparables con otros artículos como [15].

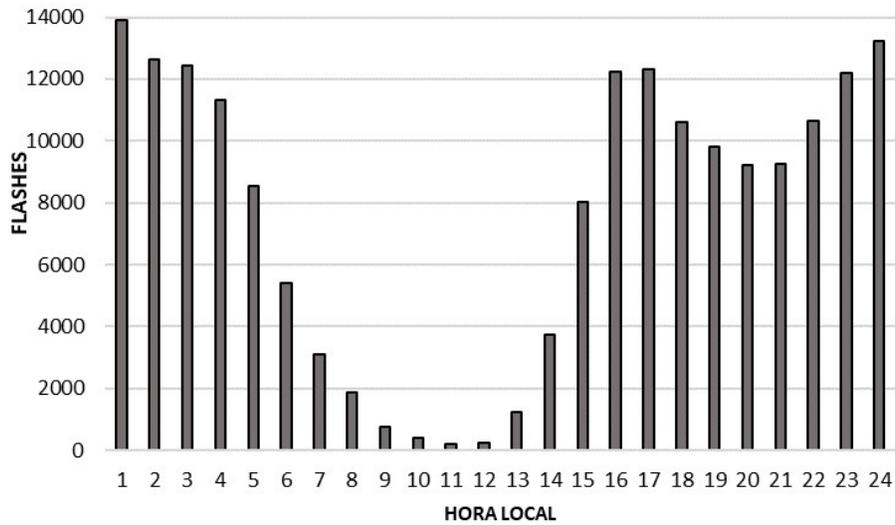


Figura 4. Cantidad de flashes nube-tierra promedio por horas de 2014 a 2016

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene una corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de octubre, noviembre y diciembre, que varían entre 35,4 kA y 38,3 kA y valores mínimos promedio en febrero y marzo de 30,7 kA y 28,9 kA respectivamente. En cuanto a descargas positivas, se observa un comportamiento uniforme cuya corriente media anual fue de 25,7 kA con valores máximos promedio en los meses de abril, octubre y noviembre, que varían entre 26,8 kA y 27 kA, y valores mínimos promedio de 25,1 kA en los meses de enero y junio.

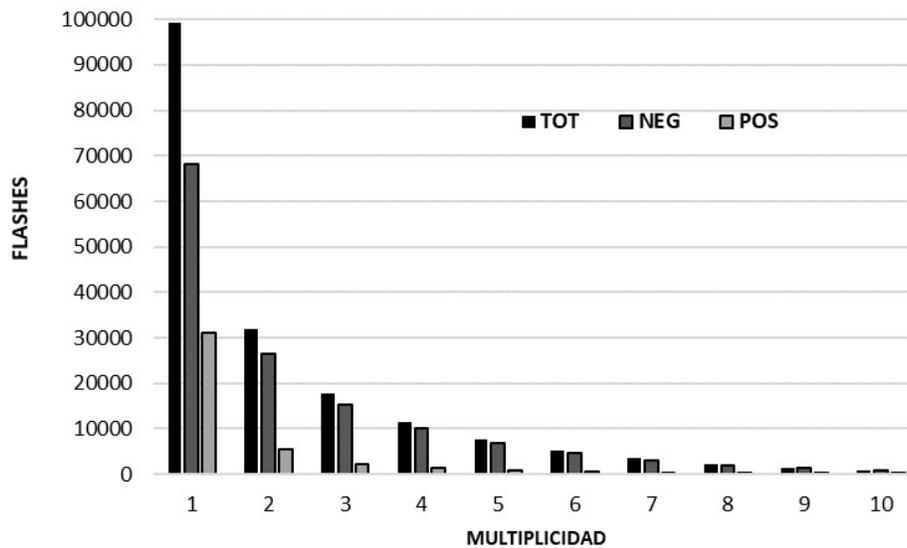


Figura 5. Multiplicidad de flashes nube-tierra promedio anuales

Fuente: Elaboración propia.

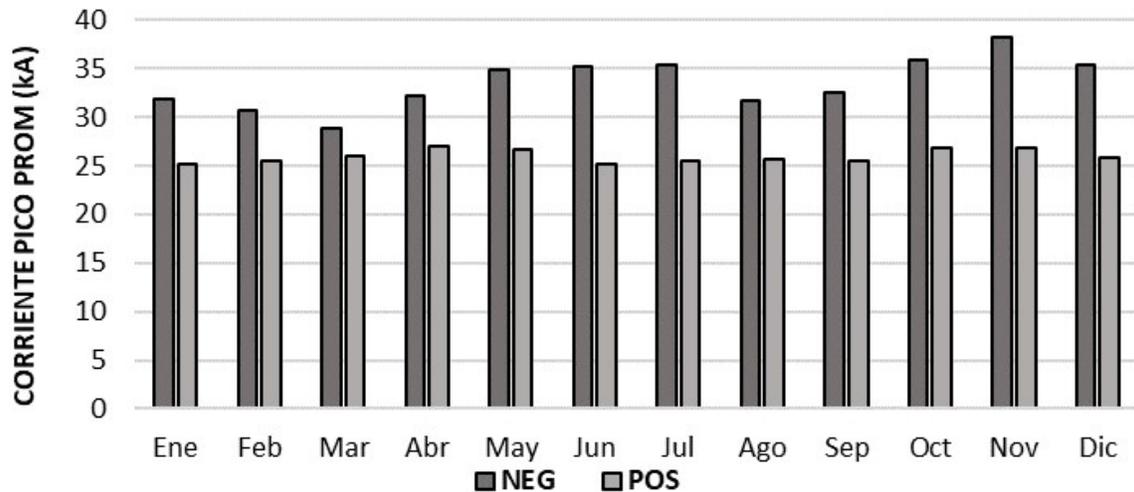


Figura 6. Corriente pico promedio de la descarga de retorno por mes

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra el histograma de corrientes pico de descarga de retorno para los flashes entre 2014 y 2016 con corrientes mayores a 10 kA, esto con el fin de comparar los resultados con los hallados en [7]. Las marcas de clase corresponden a la corriente media de cada intervalo. Se tiene que el 58,7 % de los flashes presentó corrientes pico entre 10 y 20 kA, el 19 % entre 20 y 30 kA, el 9 % entre 30 y 40 kA, y el 4,9 % entre 40 y 50 kA. Flashes con corriente de descarga de retorno mayores a 50 kA se presentaron en un 8,3 %. Así mismo, los valores máximos de corriente registrados corresponden a seis flashes con picos entre 305,3 y 345,1 kA.

3.5. Densidad de descargas a tierra en Santander (DDT)

En la Figura 8 se ilustra el mapa de la densidad de descargas a tierra en el departamento de Santander de los años 2014 a 2016, la cual se obtuvo de los flashes registrados por la red LINET en este periodo. En promedio en el 90 % del territorio santandereano incide al menos un rayo al año. En los tres años de estudio 549.596 flashes incidieron en el departamento de Santander.

Se evidencia que al suroriente del departamento hay una zona (comprendida por los municipios de Charalá, Gámbita, Suaita y Oiba) de altos valores de densidad de descargas a tierra que oscila entre 27 y 39 flashes/km²/año, igualmente al occidente del departamento en la mayoría de territorio de Bolívar y Cimitarra, y en una pequeña parte del municipio de La Belleza, lo que es congruente con la actividad de rayos analizada mediante el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio, que para estos municipios varía entre 9,67 y 12,59 flashes/km²/año.

Áreas reducidas de los municipios de Sucre, El Playón, Vélez, Landázuri, Puerto Parra y Barrancabermeja presentan valores elevados de DDT como se observa en las tonalidades más oscuras de la figura en mención.

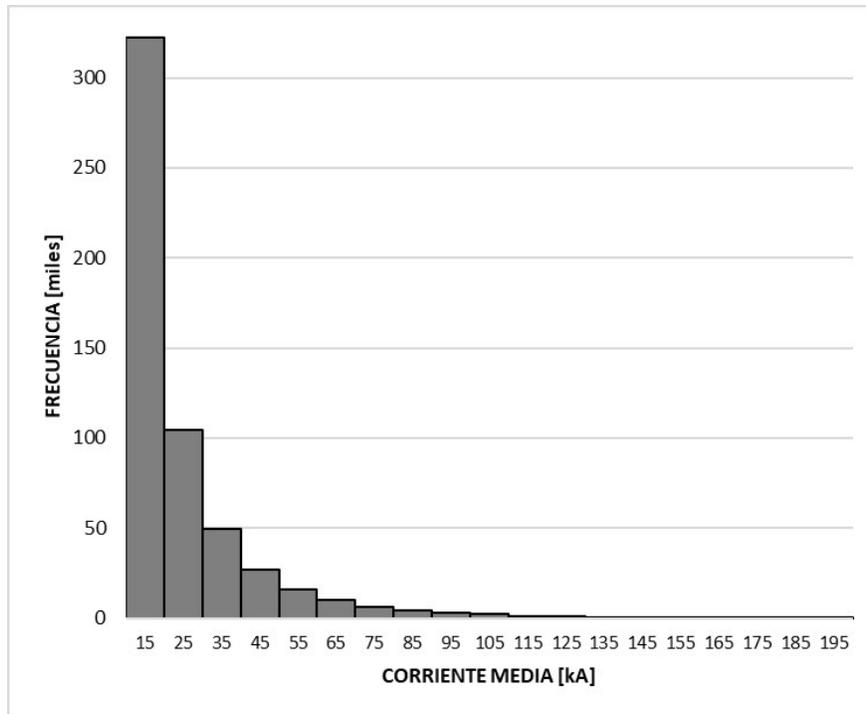


Figura 7. Histograma de corrientes de descarga de retorno durante el periodo de estudio

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla IV muestra los diez municipios con los valores más elevados de DDT en el departamento, esto es, los recuadros con mayor incidencia de flashes al año, de los cuales cinco se ubican en el municipio de Suaita, cuatro en Gámbita, tres en Bolívar, dos en La Belleza, dos en Landázuri y uno en Oiba, Vélez, Charalá y La Paz respectivamente.

Tabla IV. Sitios de mayor valor de densidad de descargas a tierra en Santander

Municipio	DDT flashes/km²/año	Municipio	DDT flashes/km²/año
Suaita	39,33	Landázuri	28,67
Gámbita	30,33	La Paz	28
La belleza	30,33	Oiba	27,67
Charalá	30	Vélez	27,67
Bolívar	30	Barrancabermeja	24,67

En cuanto a valores, Suaita presenta la zona con más alta DDT del departamento con 39,33 flashes/km²/año, seguida por La Belleza y Gámbita con 30,33, Bolívar y Charalá con 30, Landázuri con 28,67, La Paz con 28, Oiba y Vélez con 27,67 y Barrancabermeja con 24,67.

Estos valores no corresponden a un año específico sino al promedio hallado en el periodo de estudio. De los nueve municipios mencionados anteriormente, seis de ellos se encuentran en la Tabla I en donde se mide la actividad de rayos, y no aparecen Landázuri, Vélez y La Paz, dado que

a pesar de que tienen zonas con elevados valores de DDT no cuentan con un promedio de flashes alto en la totalidad de su superficie, lo que si sucede con Barrancabermeja, Cimitarra y Puerto Parra.

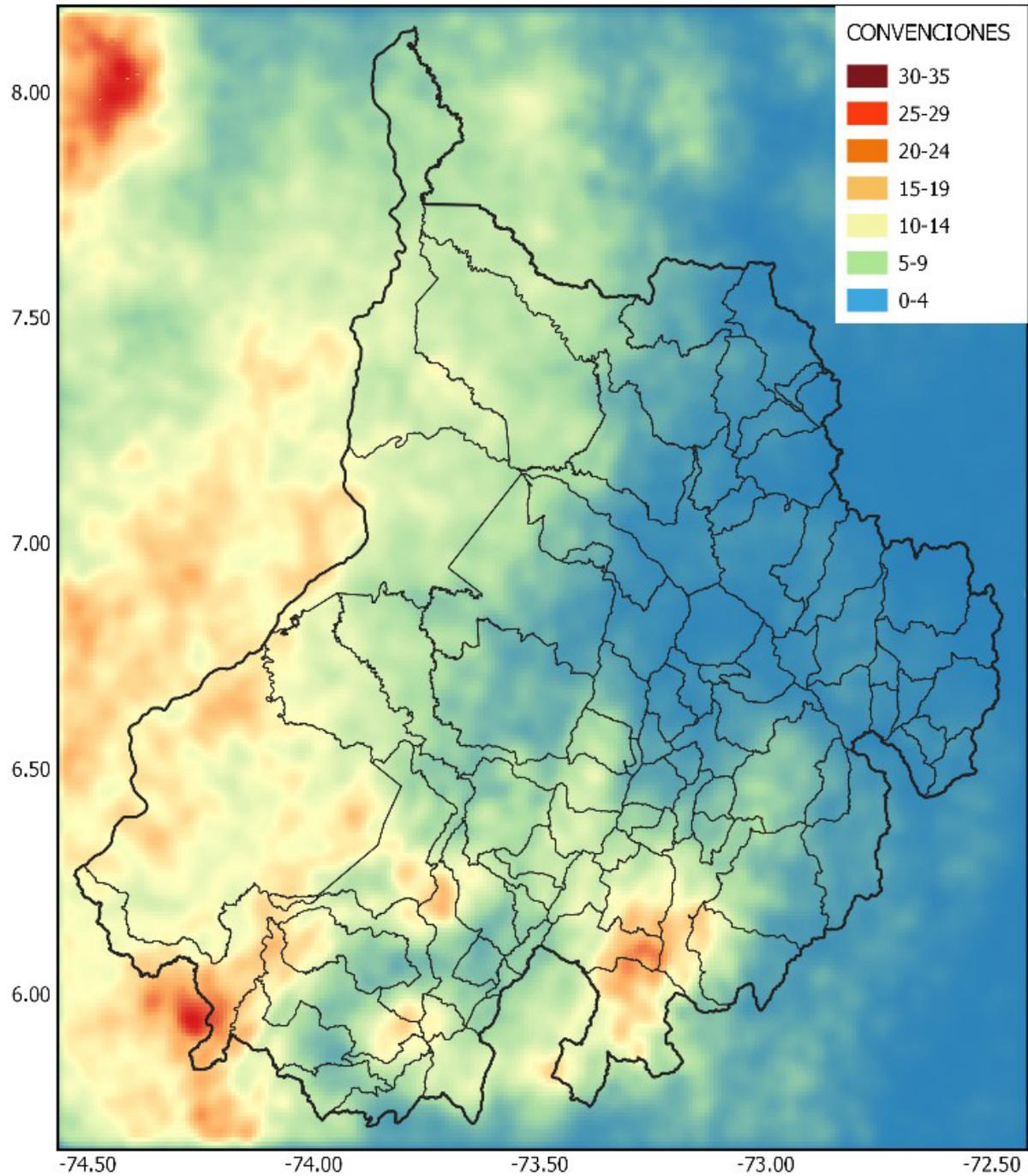


Figura 8. Mapa de la densidad de descargas a tierra de los tres años de estudio

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Las regiones con mayor actividad de rayos del departamento de Santander corresponden a los municipios de Bolívar, Cimitarra, Gámbita, Suaita, Oiba, La Belleza, Puerto Parra, Charalá y Barrancabermeja con valores de DDT que superan los 25 flashes/km²/año, estas zonas coinciden con las presentadas en [4] y [15] en donde se observa una marcada actividad de rayos en la zona suroeste y centro sur del departamento y se hallaron valores cercanos al valor dado. Este mismo comportamiento se evidencia también en [16] donde hay un aumento considerable en la actividad de rayos en zonas ubicadas al sureste de la región del Magdalena Medio y al suroeste de la región montaña noreste. Así mismo los resultados encontrados son congruentes con la tasa de rayos (Flash Rate Density FRD) mostrada por el sensor óptico LIS; se observa que al suroeste del departamento hay zonas con más de 50 flashes/km²/año, este último valor es mayor a los encontrados en el presente trabajo, debido a que se tienen en cuenta flashes nube-tierra, nube-nube e intra-nube [22]. Por su parte, regiones en municipios como Cerrito, Vetas, Concepción, Tona, Carcasí, Enciso, California, Capitanejo y Suratá, muestran la mínima actividad de rayos que es consecuente con los estudios nombrados en los que predomina una baja actividad de rayos en el extremo oriental del departamento y como se muestra también en [7] donde estas zonas cuentan con menos de 3 flashes/km²/año.

En cuanto a la variación temporal, se tiene que la actividad de rayos aumentó un 20 % en 2015 con respecto al año anterior y un 2,5 % en 2016 con respecto al primer año de estudio, con picos marcados en los meses de abril, mayo y septiembre de 2015 que superan los 29.000 flashes y valores máximos promedio en abril - mayo y septiembre - octubre que superan los 21.000. Este último comportamiento bimodal también se presenta en [1] en donde los meses de actividad eléctrica máxima son abril y octubre, en [7] donde para el periodo entre 1997 y 2001 los picos de actividad se registraron en mayo y septiembre y para el periodo entre 2007 y 2015 en abril y septiembre, y también en [15] con la diferencia en que el segundo pico de actividad se presenta en los meses de octubre y noviembre. Así mismo el sensor óptico LIS muestra picos de actividad en los meses de septiembre, octubre y noviembre [22].

Las franjas horarias de mayor actividad se presentan entre las 16:00 y las 18:00 h con un pico de 12.300 flashes a las 17:00 h, y entre las 23:00 y las 3:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a la 1:00 h, este último intervalo coincide con el pico de máxima actividad mostrado en [7], difiere con [15] en donde la máxima actividad se mantiene entre las 17:00 y las 2:00 h y es congruente con datos mostrados por el sensor óptico LIS donde predomina la actividad nocturna [22]. De igual manera, hay una variación en la hora de actividad pico en regiones de Cundinamarca, Valle del Cauca y Antioquia, donde según [1] se presenta a las 15:30 hora local; esta diferencia, según el autor, se explica dado que en zonas del Magdalena Medio son más frecuentes las precipitaciones con rayos en la noche y de madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes promedio por hora, lo que coincide exactamente con los resultados en [15].

El 76,49 % de los flashes registrados son de polaridad negativa y el 23,51 % positivos, estos valores son similares a los hallados en [7] donde el porcentaje anual es en promedio de 74,04 % para flashes negativos y 25,95 % para flashes positivos. El comportamiento encontrado es similar al de regiones de Antioquia y Caldas en donde los flashes negativos corresponden al 73,7 % y 76,9 %,

y menor al de regiones de Cundinamarca y Atlántico con 89,9 % y 84,2 % respectivamente, según polaridades promedio multianuales presentadas en [23].

De los flashes negativos el 14 % presenta más de cuatro descargas subsecuentes, mientras que solo el 6 % de los flashes positivos presenta esta misma característica. El 54,1 % de los flashes anuales promedio tiene multiplicidad igual a uno y el 87,6 % menos de cuatro, estos porcentajes son más bajos a los presentados en [15], que corresponden al 66 % y 91 % respectivamente, lo que indica que en el departamento de Santander es más frecuente que se presenten flashes con más de cuatro descargas subsecuentes.

Se obtuvo una media anual de corriente pico de descarga de retorno para flashes negativos de 33,61 kA con máximos en octubre, noviembre y diciembre, y de 25,96 kA para flashes positivos con valores máximos en abril, octubre y noviembre, estas medias son mayores a las encontradas en [7] para el periodo entre 1997 y 2001 con valores de 32,11 kA y 20,20 kA respectivamente y para los flashes positivos en el periodo entre 2007 y 2015, cuya media anual es 18 kA, en este último intervalo la media para flashes negativos fue mayor a la encontrada en el presente estudio y tomó un valor de 36,18 kA. Se tiene que el 97,6 % de flashes positivos tienen corrientes pico menores a 50 kA lo que es congruente con [7].

5. Conclusiones

En el departamento de Santander es más frecuente que los rayos tengan corrientes pico de descarga de retorno menores a 20 kA, lo que indica que los sistemas de protección contra rayos se deben dimensionar no solo para evitar daños causados por corrientes grandes sino para proteger también de estas corrientes menores. Esto es primordial al momento de escoger el nivel de protección contra rayos y determinar el radio de la esfera rodante en los diseños de sistemas de captación. Así mismo, se obtuvo un máximo promedio de corriente pico de descarga de retorno de 38,3 kA en el mes de noviembre.

El mapa de DDT presentado permite evaluar con exactitud el indicador de exposición y consigo el nivel de riesgo ante impactos de rayo en estructuras elevadas a ubicar en cualquier punto del departamento. Lo anterior es de trascendencia en la implementación de sistemas de protección contra rayos y en acciones que permitan disminuir el riesgo de daños y pérdidas humanas causadas por descargas atmosféricas.

Se encontró una marcada influencia de la topografía del terreno y de la altitud en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de cadenas montañosas a alturas menores a 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm. Muestra de ello es que los municipios de Suaita, Gámbita, Charalá, La Belleza y Bolívar, los cuales se ubican en los flancos de la Serranía de los Yariguíes y del Páramo Carnicerías de Guanque, presentan los sitios con mayor densidad de descargas a tierra con variaciones entre 30 y 39,33 flashes/km²/año, así mismo, en la mayoría del territorio de los municipios ubicados en el costado oriental del departamento sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá se presentan los

menores valores de DDT, lo que es congruente con el parámetro de densidad de descargas a tierra promedio.

Como trabajos futuros, entendiendo la dependencia geográfica encontrada en el departamento, se plantea estudiar las variaciones temporales de parámetros como las corrientes de pico, la polaridad, la multiplicidad a través de análisis meteorológicos y climáticos. Así mismo, determinar la influencia de las alturas de los centros de carga en nubes de tormenta en la determinación de los parámetros nombrados anteriormente.

Referencias

- [1] H. Torres-Sánchez, *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, Universidad Nacional de Colombia, 2002. ↑ [420](#), [421](#), [432](#)
- [2] V. A. Rakov, and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003. ↑ [420](#)
- [3] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, “Where are the lightning hotspots on earth?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068, 2016. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1> ↑ [420](#)
- [4] D. Aranguren, J. López, J. Inampué, H. Torres, and H. D. Betz, “Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography”, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, vol. 154, pp. 182-189, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010> ↑ [420](#), [422](#), [432](#)
- [5] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montaña, and J. Herrera, “Contribution to lightning parameters study based on some American tropical regions observations”, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 8, pp. 4086-4093, 2015. ↑ [420](#)
- [6] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montana, and J. Herrera, “Review of ground flash density and keraunic levels reported in tropical regions” *Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 2015. ↑ [420](#)
- [7] J. Herrera, C. Younes, and L. Porras, “Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data”, *Atmos. Res.*, vol. 203, pp. 164-174, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009> ↑ [420](#), [421](#), [422](#), [429](#), [432](#), [433](#)
- [8] H. Torres-Sánchez, “¿Qué rayos sabemos?”, *RACCEFYN*, vol. 34, no. 131, pp. 193- 208, 2010. ↑ [420](#)
- [9] K. Berger, “Blitzforschung und Personen- Blitzschutz”, *ETZ(A)*, vol. 92, pp. 508-511, 1971. ↑ [420](#)
- [10] H. Torres-Sánchez, “La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo”, *RACCEFYN*, vol.41, no. 159, pp. 174-186. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.475> ↑ [420](#)
- [11] D. F. Del Río Trujillo, *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano* [Trabajo de grado - Doctorado], 2018. [En línea] <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63293/93061400.2018.pdf> ↑ [421](#), [423](#)
- [12] J. Inampué et al., “Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data” *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, 2009. ↑ [421](#)
- [13] J. D. Pulgarín-Rivera, C. Younes, and M. Vargas, “Evaluation of a first return stroke model considering the lightning channel tortuosity”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 113, pp. 25-29, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.029> ↑ [421](#), [426](#)
- [14] J. A. López et al., “Charge structure of two tropical thunderstorms in Colombia”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 24, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188> ↑ [421](#)
- [15] H. D. Aranguren et al., “Colombian total lightning detection network and early detection of failure risks for power systems”, *SICEL VII*, pp. 1-6, 2013. ↑ [422](#), [424](#), [425](#), [427](#), [432](#), [433](#)
- [16] A. S. Cruz Bernal, *Evaluación del riesgo de rayos para Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, 2019. ↑ [422](#), [427](#), [432](#)
- [17] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Oettinger, and M. Wirz, “Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 11, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004GL019821> ↑ [423](#)
- [18] H. Betz, K. Schmidt, B. Fuchs, W. Oettinger, and H. Höller, “Cloud lightning: Detection and utilization for total lightning measured in the VLF/LF regime”, *J. Light. Res.*, vol. 2, 2007. ↑ [423](#)

- [19] H. D. Betz et al., “LINET-An international lightning detection network in Europe”, *Atmos. Res.*, vol. 91, no. 2-4, pp. 564-573, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012> ↑423
- [20] H. Holler et al., “Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany”, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 20, 2009. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7795-2009> ↑423
- [21] M. A. Uman, *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge University Press, 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511585890> ↑
- [22] K. A. Velandia, *Identificación y análisis de los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander* [Trabajo de grado], Universidad Industrial de Santander, 2018. ↑424, 432
- [23] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, “Where are the lightning hotspots on earth?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068, 2016. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1> ↑433
- [24] ICONTEC, “NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos)”, 2008. ↑

Brandon Steven Ardila Murillo

Ingeniero Electricista y estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Bucaramanga, Colombia.
Correo electrónico: brandon2208141@correo.uis.edu.co

Edison Andrés Soto Ríos

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Doctor en Ingeniería - Línea Automática de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
Correo electrónico: easotor@uis.edu.co

Kevin Alberto Velandia

Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander. Desarrolla actividades relacionadas con el diseño y la construcción de instalaciones eléctricas en media y baja tensión. Bucaramanga, Colombia.
Correo electrónico: kevinvelandia@uis.edu.co