

Caracterización de los sitios de alta actividad de rayos con base en información suministrada por
la red LINET en los municipios de Barrancabermeja y Yondó

Kevin Mauricio Rios Contreras y Maria Catalina Romero Gonzalez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Brandon Steven Ardila Murillo

Ingeniero Electricista

Codirector

Edison Andres Soto Rios

PhD. Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Primeramente, a mi madre quien es mi pilar y a quien no me alcanzará la vida para agradecer toda la dedicación, esfuerzo y amor que me ha brindado. Sin Dios y ella, no sería posible llegar donde estoy.

A mis abuelos Olga y Enrique, quienes desde mi niñez han estado presentes como mis padres y que a pesar de la distancia me han apoyado a continuar con mis estudios.

A mi compañero de vida Camilo, por brindarme su comprensión, amor y apoyo incondicional durante este camino, pero principalmente por brindarme una nueva percepción de la vida.

A mis amigos Erika y Kevin, por brindarme una amistad sincera, por los consejos y su apoyo incondicional, les deseo éxitos en sus vidas profesionales.

A la memoria de Lola, a quien amaré el resto de mi vida por enseñarme el verdadero significado de la lealtad y compañía.

María Romero

Primeramente, a Dios por todos los logros que he obtenido, con los cuales estoy en el lugar que quiero y porque sé que me acompañará en cada una de mis metas por cumplir.

A mi madre y a mi padre a los cuales debo la vida y la persona que soy, criándome y formándome con base en el amor.

A mis hermanos Jhon, Yeisy e Ingrid quienes han sido mis grandes amigos de vida y me han aportado lo mejor de si mismos.

A Andrea, con la cual conocí ese amor que va más allá de lo extraordinario, y me ha acompañado en cada momento de forma incondicional.

A mis amigos Catalina, Tatiana, Kelly y Juan David Z. que estuvieron presentes en mi etapa universitaria y me brindaron una amistad sincera.

Kevin Rios

Agradecimientos

Principalmente al profesor y director del presente proyecto Brandon Steven Ardila Murillo, por dedicar su tiempo para guiarnos, instruirnos, corregirnos y por la confianza dada al realizar este trabajo de investigación.

Agradecemos profundamente la guía brindada por el codirector del presente proyecto Edison Andres Soto Rios, quien desde un principio nos encaminó en la temática y la importancia de analizar el fenómeno natural de las descargas atmosféricas.

Agradecemos a nuestros docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, en especial a los docentes Tarcisio Leal García y Manuel José Ortiz Rangel que con cada una de sus clases establecieron un precedente en el modelo a seguir para ser ingenieros electricistas.

A Keraunos S.A.S por proveer los datos para la realización del presente proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Justificación y planteamiento del problema	14
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. Antecedentes.....	16
3.1 Actividad de rayos en Colombia y el mundo.....	16
3.2 Zona de estudio	19
3.3 Red LINET.....	22
4. Metodología.....	27
4.1 Fase 1: Localizar los sitios de alta actividad de rayos (Hotspots) presentes en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.	27
4.2 Fase 2: Determinar la distribución mensual y horaria de los impactos de rayo en los Hotspots.....	29
4.3 Fase 3: Encontrar la polaridad y multiplicidad de los impactos de rayo en los Hotspots.	29
4.4 Fase 4: Realizar un análisis estadístico de las corrientes de rayos registradas en Hotspots, que permitan caracterizarlas con base en parámetros como la media, la mediana y la desviación.	30
4.5 Fase 5: Correlacionar los Hotspots con sitios de alta actividad de rayos encontrados mediante el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra DDT.....	30
5. Resultados.....	32
5.1 Hotspots en Barrancabermeja y Yondó	32

5.2 Distribución mensual y horaria de los impactos de rayo en los Hotspots	35
5.3 Multiplicidad de los impactos de rayos en los Hotspots	38
5.4 Corriente pico de la descarga de retorno	39
5.5 Correlación entre la metodología espacial y la metodología temporal	45
6. Conclusiones	56
Referencias Bibliográficas.....	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Sitios de mayor valor de densidad de descargas a tierra en Santander.....	21
Tabla 2. Línea base entre sensores.	24
Tabla 3. Formato de presentación de los datos entregados por Keraunos S.A.S.	27
Tabla 4. Localización de los Hotspots en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.	33

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapas con los datos recolectados en las redes de detección de rayos entre 1997 y 2002	18
Figura 2. Mapa de la densidad de descargas a tierra de los tres años de estudio	20
Figura 3. Red de localización de detección de rayos LINET.	23
Figura 4. Esquema de la unidad de procesamiento.....	25
Figura 5. Diseño esquemático del manejo de la información.....	25
Figura 6. Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.....	32
Figura 7. Numeración de los Hotspots en Barrancabermeja y Yondó en función de su actividad	34
Figura 8. Distribución anual de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021	36
Figura 9. Distribución mensual de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021.....	37
Figura 10. Distribución horaria de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021.....	38
Figura 11. Multiplicidad promedio anual de flashes en Hotspots.	39
Figura 12. Corriente pico promedio de la descarga de retorno mensual	40
Figura 13. Histograma de corriente pico promedio de la descarga de retorno.....	41
Figura 14. Boxplot de la corriente pico promedio de la descarga de retorno.....	43
Figura 15. Distribución de probabilidad de la corriente.....	44
Figura 16. Probabilidad acumulada de la corriente.....	45

Figura 17. Distribución mensual en Hotspots obtenida del estudio en comparación.	47
Figura 18. Distribución horaria en Hotspots.	48
Figura 19. Multiplicidad de flashes en Hotspots.	49
Figura 20. Corriente pico promedio de la descarga de retorno.	50
Figura 21. Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.....	52
Figura 22. Principales Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.....	53
Figura 23. Hotspots en Barrancabermeja y Yondó coincidentes con estructuras elevadas.	54
Figura 24. Comparativa de la coincidencia de Hotspots en estructuras elevadas.	55

Glosario

Corriente de descarga de retorno: valor de corriente que se presenta en la descarga de retorno, esta se ve influenciada por la amplitud y forma de onda. La velocidad de esta puede llegar a valores de $1/3$ a $1/2$ de la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s).(Uman, 2008)

Densidad de descargas a tierra: número de impactos nube a tierra en una determinada zona por año, sus unidades son flashes/km²/año (Uman, 2008).

Hotspot: ubicación o zona que presenta una alta actividad de rayos, es decir; cantidad de impactos a tierra la cual se presenta de manera recurrente a través del tiempo (Albrecht et al., 2016; Ardila & Soto, 2022).

Multiplicidad: cantidad de impactos a tierra o *strokes* que se presentan en un mismo flash, para el cual, se debe impactar en un rango no mayor a 10 km y en una estampa de tiempo menor a 500 ms. Sé tiene además que al primer impacto perteneciente a un flash se le denomina *stroke* y a los demás *stroke* subsecuentes.(Conseil international des grands réseaux électriques, 2013; Younes, 2020).

Pluviosidad: cuantía de lluvia que se presenta en un sitio específico durante un determinado periodo (ASALE & RAE, s. f.).

Stroke: descarga individual que impacta a tierra (Conseil international des grands réseaux électriques, 2013).

Resumen

Título: Caracterización de los sitios de alta actividad de rayos con base en información suministrada por la red LINET en los municipios de Barrancabermeja y Yondó*

Autor: Kevin Mauricio Rios Contreras y Maria Catalina Romero Gonzalez**

Palabras Clave: Hotspot, variación temporal, Actividad de rayos, LINET.

Descripción: Se estableció una metodología para caracterizar los sitios de alta actividad de rayos o *Hotspots* en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, Colombia. Se realizó un tratamiento a los datos suministrados por la Red LINET de la actividad de rayos nube a tierra entre 2014 y 2021 en la zona de estudio. Se establecieron cuadrados de 500 m de lado de acuerdo con el error de localización de la red LINET y se determinó el número de impactos de rayo por cuadrado, en donde los sitios que hayan presentado más de diez impactos de rayo por año para el periodo de estudio se denominaron *Hotspots*. Se caracterizaron los impactos de rayo en *Hotspots* a partir de los parámetros de los rayos determinados como: la multiplicidad, polaridad y corriente de descarga de retorno; así mismo, se estudió la variación temporal en estos a partir de la distribución mensual y horaria de los impactos de rayo. Se encontraron 28 *Hotspots*, 25 ubicados en Yondó y 3 en Barrancabermeja, el *Hotspot* con mayor actividad atmosférica se encontró en este último. Se evidenció que cerca del 90% de los flashes que se presentaron en los *Hotspots* poseen multiplicidad igual a 1, además se presentó un valor de corriente pico promedio de 23.5 kA. Para la variación temporal en los *Hotspots* se presentó un comportamiento bimodal en la distribución mensual con picos en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre; la distribución horaria mostró que un 70% de los rayos en promedio que impactaron en un *Hotspots* sucedieron entre las 3:00 a.m. y 8:00 a.m. Se concluye que la metodología temporal como criterio para determinar *Hotspots* representa un factor diferenciador, debido a que permite identificar los sitios que presentan actividad de rayos de manera recurrente y poder implementar sistemas de protección contra rayos óptimos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Brandon Steven Ardila. Ing. Electricista. Codirector: PhD. Ing. Eléctrica.

Abstract

Title: Characterization of high lightning activity sites based on information provided by the LINET network in the municipalities of Barrancabermeja and Yondó*

Author(s): Kevin Mauricio Rios Contreras and Maria Catalina Romero Gonzalez**

Key Words: Hotspot, Temporal variation, Lightning activity, LINET.

Description: In this study, a methodology was established to characterize lightning hotspots in the municipalities of Barrancabermeja and Yondó, Colombia. Data provided by the LINET network of cloud-to-ground lightning activity between 2014 and 2021 in the study area were processed. Squares with sides of 500 m were established according to the location error of the LINET network, and the number of lightning strokes per square was determined. Sites with more than ten lightning strokes per year during the study period were designated as hotspots. Lightning strokes in hotspots were characterized based on determined lightning parameters, such as multiplicity, polarity, and return stroke current. The temporal variation in hotspots was studied by analyzing the monthly and hourly distribution of lightning strokes. A total of 28 hotspots were identified, with 25 located in Yondó and three in Barrancabermeja. The hotspot with the most lightning activity, with 21 strokes, was in the latter. It was found that nearly 90% of the flashes with high activity recurrently during the study period had a multiplicity of one and an average peak current value of 23.5 kA. There was a decrease in atmospheric activity over the past four years of the study, and a bimodal behavior in the monthly distribution was observed, with peaks in April, May, September, and October. For the hourly distribution, it was observed that on average, 70% of lightning strikes in a hotspot occurred between 3:00 a.m. and 8:00 a.m. It is concluded that the temporal variation as a criterion for defining hotspots represents a differentiating factor, as it allows the determination of sites with recurrent lightning activity to be identified to implement appropriate lightning protection systems. Additionally, a trend was observed in the location of hotspots along the Magdalena Riverbank.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanics. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: Brandon Steven Ardila. Electrician Engineer. Co-director: PhD. Electrical Engineer.

Introducción

La evolución del ser humano está intrínsecamente enlazada con el desarrollo científico e investigativo enfocado a los fenómenos más preocupantes para la humanidad. A lo largo de los años el ser humano ha querido encontrar una explicación a la existencia de las descargas atmosféricas y predecir su comportamiento, iniciando con interpretaciones míticas o divinas hasta llegar a las teorías científicas actuales más sofisticadas (Sánchez, 1991).

Entre los principales componentes de los sistemas eléctricos que se ven más afectados por las descargas atmosféricas se encuentran las líneas de transmisión y distribución, esto debido a que los rayos ocasionan fallas y salidas de funcionamiento, del mismo modo, son capaces de generar perturbaciones y suspensiones en el suministro de energía eléctrica en instalaciones de uso final (Sánchez, 1991) afectando la confiabilidad de los sistemas eléctricos y los estándares de calidad del servicio como el SAIDI y el SAIFI. Así mismo, este fenómeno no solo afecta la confiabilidad de los sistemas de transmisión eléctrica nacional, sino que también representa un peligro para la vida misma. Se estima que en Colombia mueren alrededor de 2 personas por cada millón de habitantes a causa de estos, haciéndolo uno de los países con más índice de muertes por rayos del mundo (Cruz et al., 2018), por lo que es importante realizar estudios e investigaciones para comprender mejor el fenómeno en el país con el fin de mitigar su acción devastadora.

Las zonas de alta actividad de rayos han sido estudiadas mayormente utilizando metodologías espaciales por medio de parámetros como la densidad de descargas a tierra (DDT) (Aranguren, 2013; Ardila & Soto, 2022). Hasta el momento no se han implementado metodologías que involucren la variación temporal para determinar los sitios de alta actividad de rayos, ni se han caracterizado parámetros como la multiplicidad y la corriente pico de la descarga de retorno.

Colombia hace parte de la zona con mayor actividad atmosférica registrada en el mundo, la zona ecuatorial terrestre (Albrecht et al., 2016). Lo anterior debido a que el país se ubica en la zona de convergencia intertropical (ZCIT) en donde los vientos alisios del hemisferio norte y sur convergen (Albrecht et al., 2016; Guzmán et al., 2014), así mismo, las cadenas montañosas que atraviesan el territorio colombiano sirven como barrera natural para que vientos húmedos y cálidos asciendan y causen colisión entre hidrometeoros suspendidos en la atmósfera y por tanto se brinden las condiciones para la iniciación de rayos. Un estudio realizado en el Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas en la Universidad de Sao Paulo-Brasil, clasifica los lugares con mayor frecuencia de rayos por regiones en Suramérica, donde 7 de las 10 regiones estudiadas se encuentran en Colombia (Albrecht et al., 2016), haciendo que el país sea por designio de la naturaleza un laboratorio para el estudio de este fascinante fenómeno atmosférico.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, este trabajo de investigación tiene como fin ubicar y caracterizar los *Hotspots* o sitios que presentan una alta actividad de rayos de forma recurrente en los municipios de Barrancabermeja y Yondó a partir de datos de impactos de rayo suministrados por la empresa Keraunos (Red Colombiana de Detección Total de Rayos, con tecnología LINET) para el periodo comprendido entre 2014 y 2021. En la cual se busca analizar la variación temporal de la actividad atmosférica presente en los municipios de estudio por medio de distribuciones anuales, mensuales y horarias; además de caracterizar los *Hotspots* por medio del estudio de los parámetros del rayo que se presentan, tales como: la polaridad, la multiplicidad y la corriente pico de descarga de retorno. Finalmente realizar una comparativa de las metodologías espaciales y temporales, con el fin de establecer similitudes y distinciones entre estas.

1. Justificación y planteamiento del problema

Zonas ecuatoriales como Barrancabermeja y Yondó presentan una alta actividad de rayos, por lo que se hace necesario caracterizar este fenómeno natural con fines de diseñar sistemas de protección contra rayos óptimos y eficientes que se ajusten a las condiciones de cada región. Lo anterior con el fin de salvaguardar la vida, disminuir pérdidas económicas y culturales y mitigar cualquier tipo de riesgo asociado a rayos.

Los sitios de alta actividad de rayos se han determinado con base en la ocurrencia espacial de descargas nube-tierra a través de parámetros como la Densidad de Descargas a Tierra DDT (metodología convencional). Hasta el momento no se han caracterizado estos sitios con base en la ocurrencia temporal de rayos, es decir, para que una región sea un *Hotspots* se debe repetir el número de rayos y conservarse en el tiempo, o lo que es igual, se debe presentar de manera recurrente.

En la zona de estudio hay una presencia importante de torres de transmisión que aportan al despacho nacional y transportan energía para actividades de extracción de crudo. Por tanto, conocer parámetros del rayo como la multiplicidad, polaridad y corriente de descarga de retorno y así mismo la distribución mensual y horaria de estos impactos en zonas tropicales y específicamente en *Hotspots* permiten que el diseño de las protecciones para estas locaciones pueda brindar una mayor confiabilidad a los sistemas eléctricos y los estándares de calidad del servicio como el SAIDI y el SAIFI.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología que caracterice los sitios de alta actividad de rayos (*Hotspots*) en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.

2.2 Objetivos Específicos

- Localizar los sitios de alta actividad de rayos (*Hotspots*) presentes en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.
- Determinar la distribución mensual y horaria de los impactos de rayo en los *Hotspots*.
- Encontrar la polaridad y multiplicidad de los impactos de rayo en los *Hotspots*.
- Realizar un análisis estadístico de las corrientes de rayos registradas en *Hotspots*, que permitan caracterizarlas con base en parámetros como la media, la mediana y la desviación.
- Correlacionar los *Hotspots* con sitios de alta actividad de rayos encontrados mediante el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra DDT.

3. Antecedentes

3.1 Actividad de rayos en Colombia y el mundo

Los primeros mapas detallados de frecuencia y distribución de rayos alrededor del mundo fueron hallados por Christian et al. (2003) y Boccippio et al. (2000) mediante el OTD (Detector Transitorio Óptico), siendo un prototipo de LIS (Lightning Imaging Sensor), el cual fue el primer satélite enviado por la NASA en 1995 encargado de encontrar la actividad de rayos en el mundo. Los mapas brindaron suficiente información para encontrar que la mayor distribución de rayos se localiza en las regiones tropicales, áreas costeras y zonas montañosas. Estas regiones se localizaron en la cuenca ecuatorial del Congo, Kamembe, Ruanda, Nigeria, entre otros; seguido por regiones de América del Sur como el Norte de Argentina, Paraguay, Brasil y sitios aislados de Colombia y Venezuela. En Sudamérica las montañas de la cordillera de los Andes funcionan como un muro natural para los vientos húmedos de los valles del Amazonas facilitando el desarrollo de tormentas eléctricas (Albrecht et al., 2016).

El primer parámetro que se estableció para encontrar las distribuciones de la actividad de rayos a nivel mundial fue el nivel cerámico (NC), el desarrollo tecnológico a principios del siglo XX permitió que en Francia se desarrollara el primer mapa local del nivel cerámico, siguiendo este desarrollo países como Inglaterra y Rusia (Younes, 2020). En 1990's, fueron diseñados y fabricados por la NASA dos sensores de imágenes de rayos LIS (por su sigla en inglés, Lightning Imaging Sensor), los cuales tenían como objetivo la observación y detección de la actividad de rayos en la misión de medición de precipitaciones tropicales (TRMM). Durante 17 años la misión fue exitosa, pero llegó a su fin en octubre del 2014 como resultado al agotamiento de combustible del satélite donde se posicionaron estos sensores, cabe destacar que los resultados poseían hasta

88% de eficiencia en la noche a pesar de que la duración de la observación de estos sensores en un punto ubicado en la tierra era de 90 segundos (Albrecht et al., 2016; NASA, s. f.).

A nivel nacional, para el año de 1969 se conformó el instituto colombiano de hidrología, meteorología y adecuación de tierras y estudios ambientales (HIMAT) que en conjunto de la Universidad Nacional de Colombia llegaron a un acuerdo para la realización en conjunto del primer mapa colombiana de nivel Ceráunico, el cual fue elaborado teniendo en cuenta criterios sistema orográfico del país para la creación de las líneas ceráuneas (Sánchez, 1991; Torres & Castaño, 1991). En Colombia, para el año de 1991 se había planteado la primera metodología que permitía modelar el nivel Ceráunico mediante la correlación de las series de tiempo de la medida de la pluviosidad la cual contaba con 95% de confianza y afirmaba ser aplicable a los diferentes parámetros del rayo como la DDT, polaridad, etc. (Torres & Castaño, 1991). Dicha metodología fue desarrollada por el profesor Horacio Torres, perteneciente al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia el cual expuso que el análisis de estos se debía realizar desagregando tres niveles geográficos (global, regional, local) (Torres & Castaño, 1991).

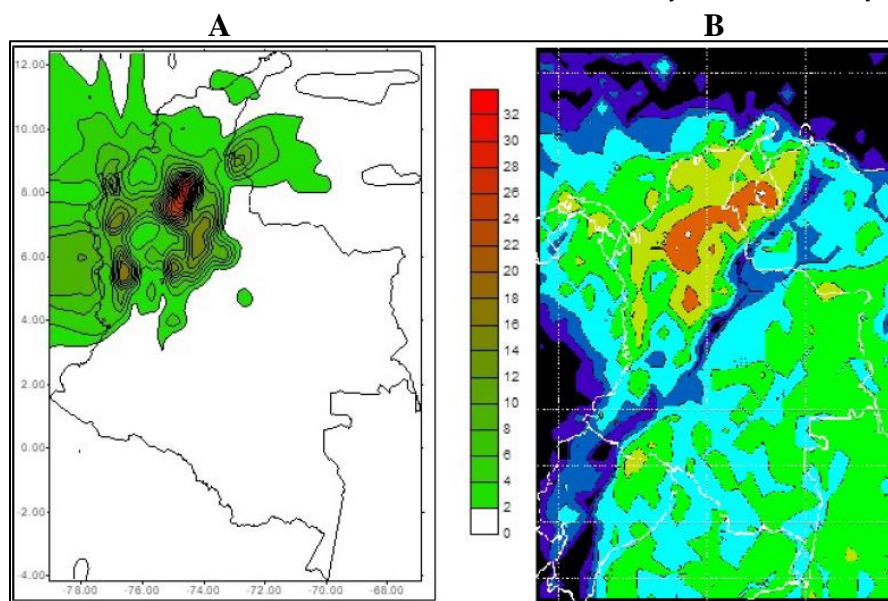
En 1997 se implementó la primera red localizadora de rayos denominada RECMA en el Magdalena medio colombiano el cual estuvo en servicio durante 5 años. Dicha red estaba constituida por 6 sensores LPATS (Lightning Position and Tracking System) y una unidad de procesamiento central que funcionaba mediante el mecanismo de tiempo de arribo (TOA) capaz de detectar corrientes superiores a 10 [kA] y rayos intranube (Younes, 2020). En el periodo de 2007 a 2015 se actualizó el nombre de dicha red a SID y se realizó una mejora de los sensores existentes (Aranguren et al., 2017; Keraunos S.A.S, 2016), los cuales funcionaban mediante la unión de los mecanismos de TOA (Tiempo de arribo) y MDF (Radiogoniometría magnética) para encontrar el punto de impacto (Herrera et al., 2018). Para el año 2011 la empresa Keraunos instaló

una red denominada LINET capaz de detectar descargas nube a tierra (CG) y las descargas intranube (IC) (Keraunos S.A.S, 2016).

Para el año 2002, Younes & Torres realizaron los primeros análisis mediante los datos suministrados por la red RECMA, en este estudio se presentó una ecuación que relaciona la densidad de descargas a tierra (DDT) con el número de días tormentosos al año (Td) (Younes, 2020). Gracias a este artículo se desarrollaron los mapas de densidad de descargas a tierra con los datos suministrados por RECMA (Figura 1. A) y con los datos suministrados por el sistema de detección de rayos satelital utilizados por la NASA para la misión de medición de precipitaciones tropicales (Figura 1. B), corroborando los resultados obtenidos por RECMA.

Figura 1

Mapas con los datos recolectados en las redes de detección de rayos entre 1997 y 2002.



Nota. Mapas con los datos recolectados en las redes de detección de rayos entre 1997 y 2002. A: red de localización de rayos terrestre. B: sistema de detección de rayos satelital. Tomada de Younes, 2020.

En 2016, Albrecht et al. (2016) determinó los 500 sitios en la tierra que presentan la más alta actividad de rayos o *Hotspots*. Se concluyó que África ocupaba 283 lugares con mayor actividad de rayos, Asia 87, Sur América 67, Norte América 53 y Oceanía 10, sorprendentemente el punto principal de impactos de rayos sobre la tierra ocurre en el lago de Maracaibo de Venezuela (sur América) presentando una DDT de 232.52 flashes/km²/año. Colombia se ubicó en el 4° lugar con mayor actividad atmosférica en el mundo con el municipio de Cáceres con un valor de DDT de 172.29 flashes/km²/año; Colombia tuvo 7 de los 10 lugares con mayor actividad en Sur América, esto es debido a su ubicación en la Zona Tropical de Convergencia (ZCIT) en donde los vientos alisios del hemisferio norte y sur convergen (Albrecht et al., 2016; Guzmán et al., 2014), que en combinación con la topografía del país al presentar cadenas montañosas como lo es la Cordillera de Los Andes, la cual se ramifica en la cordillera central, occidental y oriental, generan una barrera natural para que vientos cálidos y húmedos asciendan y provoquen la colisión de los hidrometeoros suspendidos en la atmósfera, generando las condiciones ideales para iniciación de tormentas eléctricas. Dichas formaciones han sido nombradas, entre las que se destacan: el Nevado del Huila, el Nevado de Santa Isabel, el Nevado del Ruiz, el Nevado del Tolima y el Nevado del Quindío, siendo el primero de estos donde se encuentra la cordillera que alcanza la mayor altura con 5.330 msnm (IDEAM, s. f.).

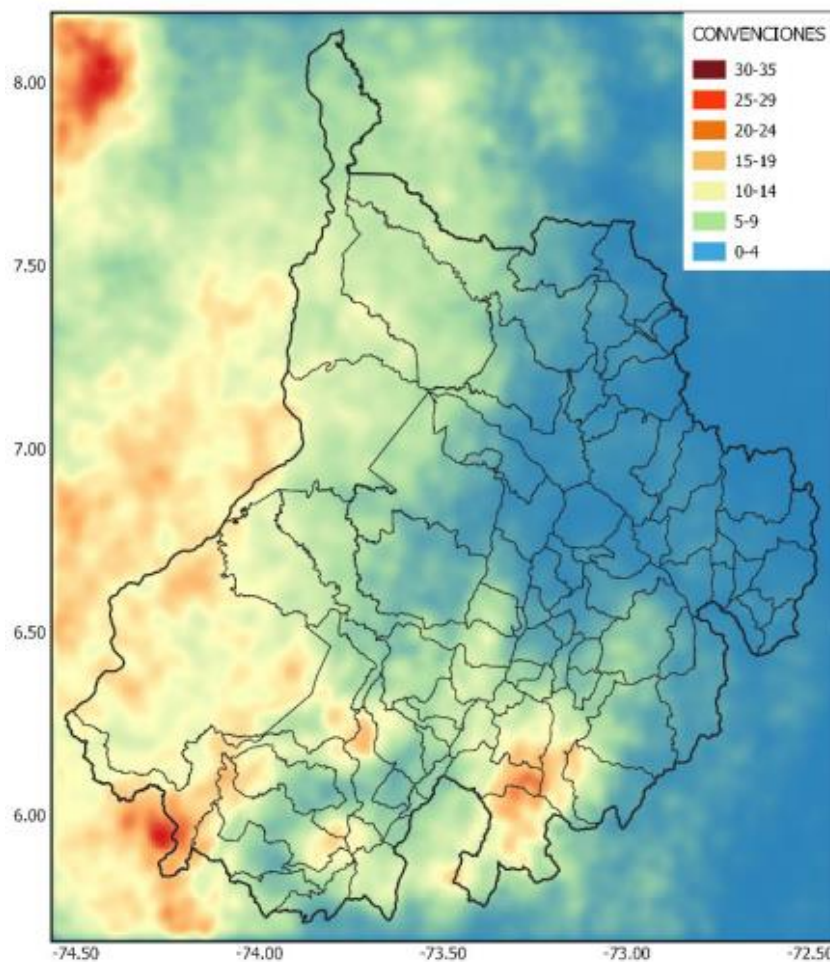
3.2 Zona de estudio

En los municipios de Barrancabermeja y Yondó se han desarrollado diversos estudios donde se contempla la variación temporal y espacial de los sitios de alta actividad de rayos. En el artículo realizado por Ardila et al. (2021) se concluyó que los municipios con mayor actividad de rayos se encuentran en los costados de las cadenas montañosas con alturas menores a los 1.500 msnm, y los municipios donde la actividad de rayos es menor se sitúa en los cerros donde las

alturas oscilan entre 3.000 y 3.500 msnm. En la Figura 2 se observa el mapa de DDT del departamento de Santander realizado con base en los datos de la actividad de rayos en el departamento suministrados por la red LINET.

Figura 2

Mapa de la densidad de descargas a tierra de los tres años de estudio



Nota. Mapa de densidad de descargas a tierra del año 2014 a 2016 en el departamento de Santander, Colombia. Tomada de Ardila et al., 2021.

En la Tabla 1 se evidencia que los valores de DDT encontrados en los municipios de Santander son elevados, que en conjunto a la presencia de estructuras de transmisión que permiten el suministro de energía y la afluencia de campos petroleros en estas regiones, generan la necesidad de estudiar dichas zonas en materia de descargas atmosféricas, buscando la mejoría de los estándares de calidad de servicio de energía eléctrica como lo son el SAIDI y SAIFI.

Tabla 1

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

Municipio	DDT flashes/km ² /año	Municipio	DDT flashes/km ² /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

Nota. Sitios de mayor valor de densidad de descargas a tierra en Santander con su valor correspondiente de DDT. Tomada de Ardila et al., 2021.

Ardila & Soto (2022) plantearon una metodología para determinar la influencia de las estructuras elevadas en Barrancabermeja y Yondó con zonas de alta actividad impactos de rayo, utilizando como parámetro la variación temporal de las descargas nube a tierra CG mediante la determinación de los lugares que presenten grandes cantidades de impactos de rayos en el periodo de tiempo de estudio comprendido entre 2016 y 2020. Gracias a esta investigación se concluye que los lugares encontrados como *Hotspot* en total fueron 269 de los cuales 34 se encuentran en el municipio de Barrancabermeja y 235 en el municipio de Yondó.

3.3 Red LINET

En el año 2004, se dio a conocer una nueva técnica de detección nombrada LINET, la cual opera en el rango de las frecuencias de muy bajas VLF y en bajas frecuencias LF (por su sigla en inglés, respectivamente *very low frequency and low frequency*) (Betz et al., 2007; Höller et al., 2009). Mediante la ubicación de mínimo 14 sensores a distancias no mayores de 250 km, se hace posible la discriminación entre descargas atmosféricas intranube y descargas nube a tierra, con la posibilidad de detectar amplitudes de corrientes menores a 2 kA (Aranguren et al., 2017).

Esta se dio a conocer como la red de detección total de rayos. Para el periodo de 2011 a 2012 fueron instalados diez sensores de la red LINET a lo largo del territorio colombiano cubriendo un total del 70%. Estos se instalaron en altitudes de 0 a 5750 msnm (Aranguren et al., 2017). Para el año 2016 se instalaron 7 sensores adicionales como se observa en la Figura 3 contando con un cubrimiento del 80% del territorio colombiano en donde más del 92 % de la población del país cuenta con una eficiencia de por lo menos un 95% (Keraunos S.A.S, 2016).

En total con 24 sensores ubicados a lo largo del territorio colombiano, de los cuales 2 de ellos se encuentran en Venezuela y Panamá (Younes, 2020), 15 de estos cuentan con distancias inferiores de 200 km respecto al sensor más cercano. En Colombia la línea base promedio determinada para el sistema es de 153 km como se muestra en la Tabla 2, adicional se cuenta con 2 sensores ubicados en Campo Rubiales y Pasto con distancias al sensor más cercano de 290 y 277 respectivamente (Keraunos S.A.S, 2016).

Figura 3

Red de localización de detección de rayos LINET.



Nota. Mapa de ubicación de los sensores de la red de localización de detección total de rayos LINET en Colombia. Tomada de Keraunos S.A.S, 2016.

Cada estación está conformada por una antena de campo magnético, un GPS y una unidad de procesamiento local, como se representa en la Figura 4. La unidad de procesamiento local realiza 5 procesos, los cuales son: el Triggering, el cual permite establecer los umbrales de medición, definiendo así la sensibilidad de la detección; el Preprocessing, como su nombre lo indica es el pre-proceso de la formas de onda de campo magnético; el Data-Transfer, que permite la transferencia de datos de manera correcta para que sean recibidos por la unidad de

procesamiento central del sistema, permitiendo así la comparación de los datos de varias estaciones con el fin de presentar una mayor exactitud como se puede observar en la Figura 5; el Self-Monitoring, el cual permite el auto monitoreo en cada estación; y por último, se tiene el proceso de Local Archive que permite almacenar las formas de onda detectadas por la antena de campo magnético (Keraunos S.A.S, 2016).

Tabla 2

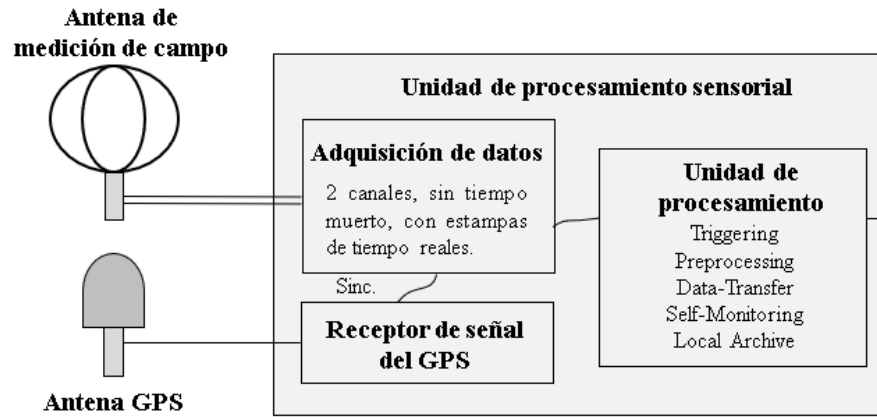
Línea base entre sensores.

No.	Sensor	Distancia al sensor más cercano (km)
1	Montería	148
2	Medellín	195
3	Albania	169
4	Cúcuta	175
5	Barranca	155
6	Bogotá	126
7	Chigorodó	148
8	La Jagua	169
9	Tunja	131
10	Ibagué	126
11	Palmira	127
12	Neiva	127
13	Puerto Triunfo	113
14	Arauca	195
15	Barranquilla	198
	Promedio	153

Nota. Tomada de Keraunos S.A.S, 2016.

Figura 4

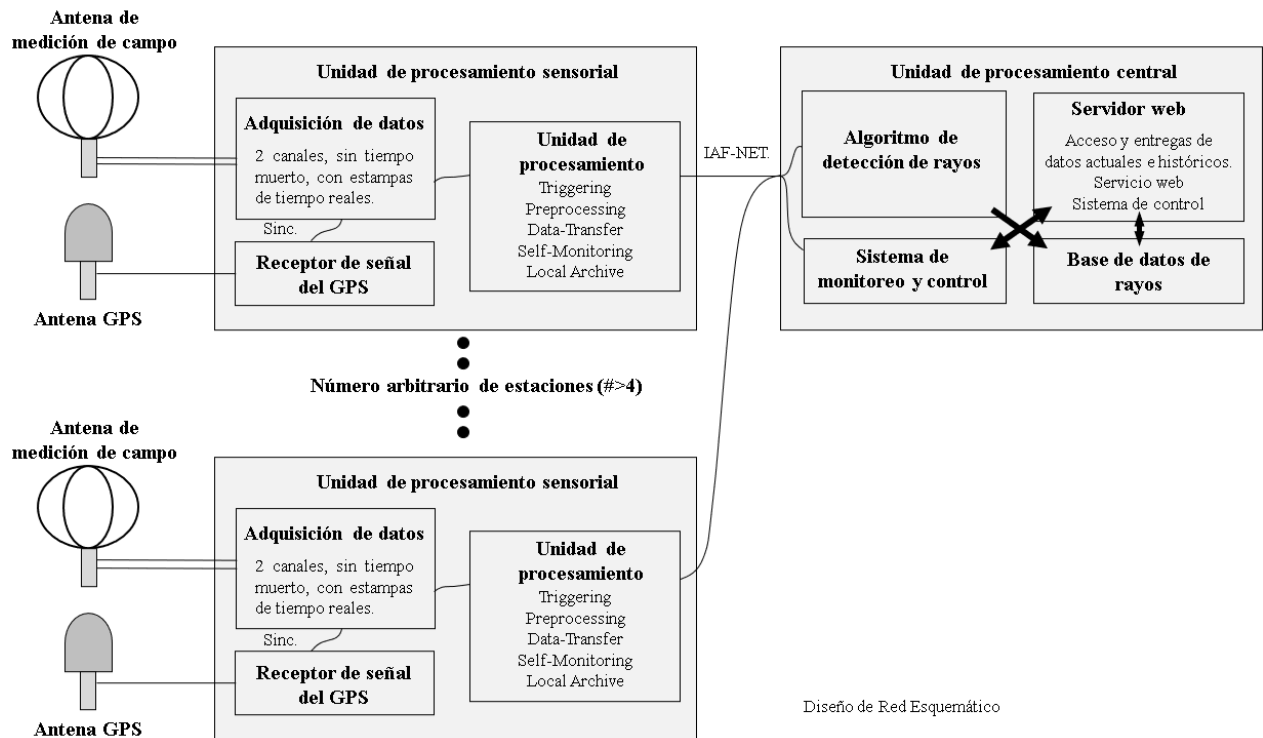
Esquema de la unidad de procesamiento.



Nota. Modificado de Keraunos S.A.S, 2016.

Figura 5

Diseño esquemático del manejo de la información.



Diseño de Red Esquemático

Nota. Modificado de Keraunos S.A.S, 2016.

Las antenas de medición de campo captan la señal de campo magnético emitida que se genera al presentarse una descarga eléctrica ya sea intranube o nube a tierra y mediante la utilización del GPS se establece las estampas de tiempo. Una vez se realice el proceso de transferencia de data a la unidad central, se procede a calcular mediante el algoritmo parámetros de la descarga atmosférica de cada *stroke* tales como la ubicación (latitud y longitud, con errores de localización, tiempo, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, altura de emisión en caso de que los rayos sean intranube, discriminación del tipo de rayo (nube a tierra (CG) o intranube (IC)), error en la detección, multiplicidad del flash (M), polaridad (P), forma de onda presentada y mediante algunas herramientas de procesamiento se obtiene la densidad de descargas a tierra (DDT) (Keraunos S.A.S, 2016).

4. Metodología

4.1 Fase 1: Localizar los sitios de alta actividad de rayos (Hotspots) presentes en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.

Los municipios de Barrancabermeja y Yondó presentan una alta actividad de rayos debido a que se encuentran ubicados en una zona tropical, que en conjunto con la presencia importante de torres de transmisión las cuales aportan al despacho nacional y transportan energía para actividades de extracción de crudo, hacen necesario la caracterización del fenómeno natural mediante los parámetros del rayo con el fin de diseñar sistemas de protección contra rayos óptimos y eficientes que se ajusten a condiciones atmosféricas severas calculadas en dichas regiones. Lo anterior con el fin de salvaguardar la vida y proteger los equipos expuestos a impactos de rayo.

Se procesaron los datos suministrados por la red LINET relacionados con los impactos de rayo en Barrancabermeja y Yondó entre los años 2014 a 2021. La red LINET proporciona para cada *stroke* información de: la fecha, hora, minuto, segundo, latitud, longitud, altura, tipo (tipo 1: descargas nube a tierra y tipo 2: descargas intranube), amplitud de la corriente de descarga de retorno y el error en la detección, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Formato de presentación de los datos entregados por Keraunos S.A.S.

Fecha	Hora	Minuto	Segundo	Latitud	Longitud	Altitud	Tipo	Corriente	Error
1/01/2014	11	52	21946	6177	-739833	0	1	75	8
2/01/2014	20	33	12785	60596	-73246	0	2	-129	1
3/01/2014	23	40	1276	61531	-73259	0	1	-135	16
5/01/2014	8	8	38887	59477	-744658	0	1	-26	7
5/01/2014	8	30	17632	60922	-745461	0	1	-154	11

Nota. Datos suministrados por Keraunos S.A.S, 2016.

Así mismo se descartaron las descargas intranube IC, las cuales poseen alturas superiores a 0 km y presentan corrientes menores a 10 kA (Doswell, 2001; Keraunos S.A.S, 2016). Con lo anterior se tiene como resultado un conjunto de *strokes* con corrientes mayores o iguales a 10 kA y tipo 1 (*Cloud to Ground*). La red LINET establece una circunferencia como margen de error en la ubicación del impacto real tomando como eje el punto de impacto registrado. Con el fin de abarcar a cabalidad los territorios de Barrancabermeja y Yondó se establecieron cuadrados, debido a que el uso de círculos tangentes a lo largo del territorio de los municipios para el margen de error de cada *stroke* como lo propone la red LINET dejaría grandes zonas sin considerar.

Mediante el análisis de los datos para el error de localización de los *strokes* que se presentaron en el periodo de estudio se determinaron parámetros como la media, la mediana y los intervalos intercuartiles. Se obtuvo en primera instancia un error promedio en la localización de 156 metros para la zona de estudio, siendo aproximado con el valor proporcionado por Keraunos S.A.) que establece un error promedio en la localización de 200 metros para la zona céntrica de la región Andina Colombiana. Adicionalmente, se observaron los rangos intercuartiles Q1 y Q2 comprendido entre 70 y 110 metros, Q2 y Q3 entre 110 y 190 metros, finalmente Q3 y Q4 entre 190 y 370 metros, además de los valores outliers por encima del Q4 de hasta 2 km. Por consecuente se estableció un valor de 250 metros para el radio de margen de error, que si bien supera el calculado en análisis de los datos suministrados, está entre el cuartil Q3 y Q4 siendo más representativo de los datos analizados y se hace con el fin de dar mayor flexibilidad a la medición y considerar posibles impactos que se hayan salido del margen del error promedio proporcionado, por ende una vez establecido dicho valor, el tamaño de los cuadrados empleados a lo largo de los territorios de Barrancabermeja y Yondó se estableció de 500 m de lado. Por último, se contaron los impactos por recuadro, de donde se escogieron los sitios donde se hubiera presentado una

actividad de más de diez impactos anuales a tierra en cada uno de los años, o, en otras palabras, que hayan registrado una actividad recurrente.

4.2 Fase 2: Determinar la distribución mensual y horaria de los impactos de rayo en los Hotspots.

Una vez localizados los *hotspots* en la zona de estudio, se filtraron las descargas de rayo incidentes en estos sitios. Para el análisis de la variación temporal de rayos en *hotspots*, se obtuvieron las distribuciones mensuales y horarias de impactos de rayo representadas en histogramas de frecuencia. Para la distribución mensual se agruparon los *strokes* que hayan ocurrido en el mismo mes durante el periodo de 2014 al 2021, de manera análoga, para la distribución horaria se agruparon los *strokes* ocurridos durante el periodo de estudio, que hayan ocurrido a la misma hora.

4.3 Fase 3: Encontrar la polaridad y multiplicidad de los impactos de rayo en los Hotspots.

Se realizó la distinción de la polaridad de la descarga de retorno (positiva o negativa) de los *strokes* comprendidos en el período del 2014 al 2021; por medio de un histograma con el cual se efectuará un análisis cuantitativo.

Se definió la cantidad de *strokes* que se presentan en un mismo flash, a esto se le denomina multiplicidad de un flash, para el cual, se deben cumplir ciertas condiciones como impactar en un rango no mayor a 10 km y en una estampa de tiempo menor a 500 ms (Younes, 2020). Esta clasificación se realizó con base en los datos de *strokes* comprendidos entre el 2014 al 2021 que cumplieron las condiciones necesarias para ser considerados parte de un mismo flash, para lo cual se utilizó el algoritmo realizado por el Dr. Diego Fernando del Rio mediante el sistema de cómputo numérico MATLAB. Por último, teniendo la multiplicidad de los flashes se realizó un histograma con el cual se efectuó un análisis cuantitativo.

4.4 Fase 4: Realizar un análisis estadístico de las corrientes de rayos registradas en Hotspots, que permitan caracterizarlas con base en parámetros como la media, la mediana y la desviación.

Mediante la utilización de diagrama de cajas y bigotes se realizó el análisis estadístico de las corrientes del rayo registradas en *Hotspots* utilizando la media, mediana y la desviación estándar con el fin de definir el comportamiento de los datos comprendidos durante el período del 2014 al 2021. Además, mediante la utilización de un histograma de frecuencia se analizaron las corrientes pico promedio de la descarga de retorno y por medio de un diagrama de barra las corrientes pico promedio de la descarga de retorno mensual. De igual forma se encontró la distribución de probabilidad y la probabilidad acumulada de la corriente de descarga de retorno de rayos en *Hotspots*.

4.5 Fase 5: Correlacionar los Hotspots con sitios de alta actividad de rayos encontrados mediante el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra DDT.

Para corroborar tanto la ubicación geográfica de los *Hotspots* determinados, así como el comportamiento de la actividad atmosférica en dichos *Hotspots* determinados se realizó un análisis comparativo para cada uno de los casos.

Para la corroboración geográfica de los *Hotspots*, mediante la utilización del software QGIS se realizó un análisis comparativo con los sitios de alta actividad de rayos determinados en el trabajo de investigación realizado por Ardila & Soto (2022) que establece una metodología similar a la empleada.

Seguido a esto, para la comparativa del comportamiento de la actividad atmosférica en *Hotspots*, se analizaron de los resultados de la variación temporal (distribuciones mensuales y horarias) y de los parámetros del rayo (corrientes, multiplicidad y polaridad) del presente estudio,

que implementó la metodología temporal y entre los resultados del artículo realizado por Ardila et al. (2021) el cual involucra, en cambio, la metodología espacial utilizando el parámetro de la DDT. En dicho artículo debido al alto valor de DDT presentado en el departamento de Santander, fue determinado con el sitio de alta actividad de rayos estudiado.

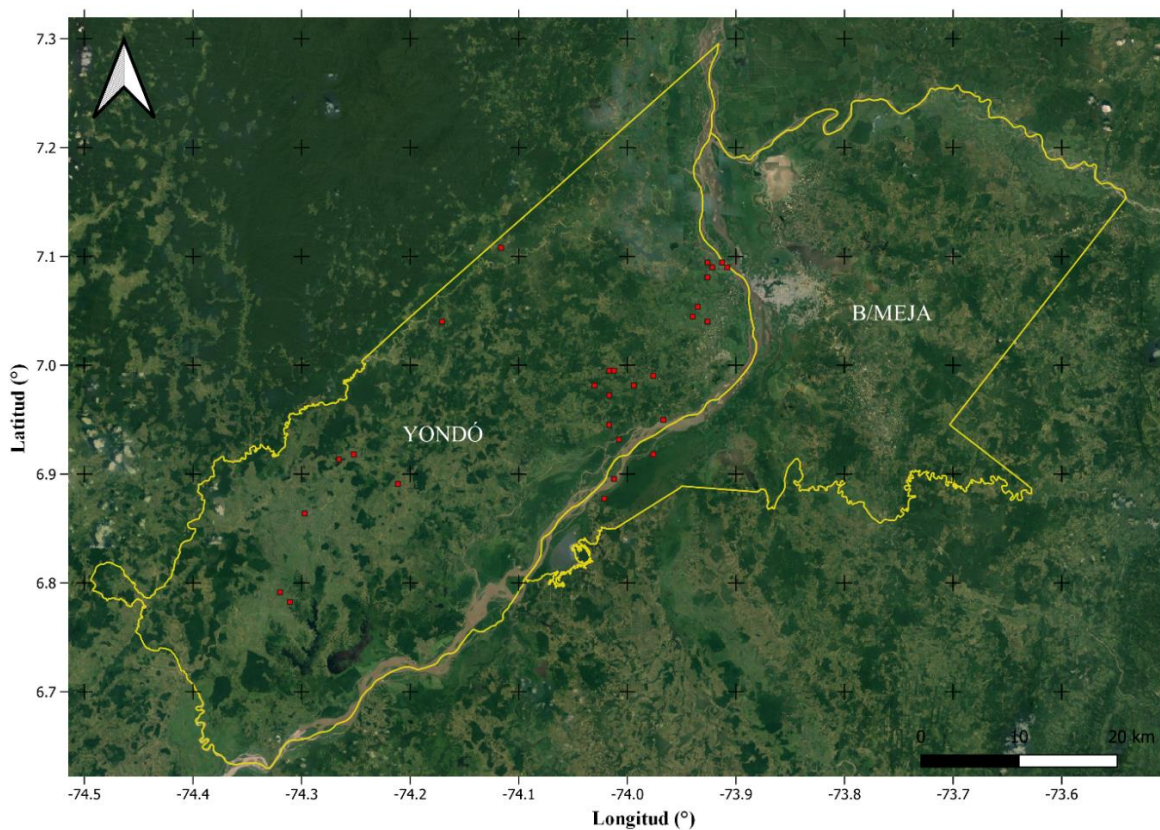
5. Resultados

5.1 Hotspots en Barrancabermeja y Yondó

Con los datos obtenidos de cada stroke previamente filtrados que se presentaron entre los años 2014 a 2021 en los municipios de estudio, se determinaron las zonas delimitadas por cuadrados de 500 metros donde en el transcurso de los 8 años hayan ocurrido por más de 10 impactos de rayo en cada uno de los años, en otras palabras, se ubican los sitios que presentan una alta actividad de rayos de manera recurrente, los sitios que cumplan cuya característica fueron denominados *Hotspots*, los cuales corresponden a 28 sitios mostrados en la Figura. 6.

Figura 6

Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.



Los *Hotspots* encontrados en B/meja y Yondó se muestran en la Tabla 4, organizados en función de su actividad atmosférica de manera descendente. Geográficamente estos sitios se pueden visualizar en la Figura 7.

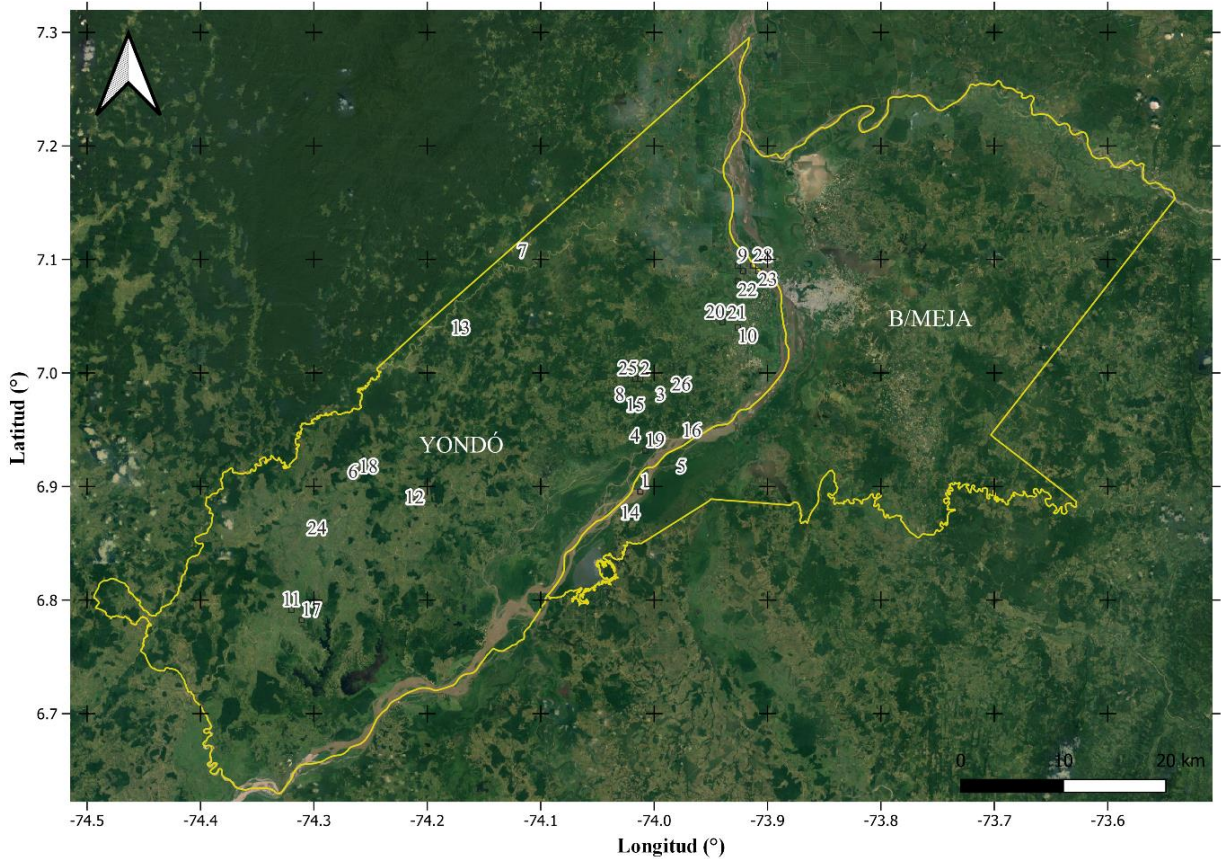
Tabla 4

Localización de los Hotspots en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.

Hotspot	Impactos	Latitud (°)	Longitud (°)	Municipio
1	21	-74.021	6.895	Barrancabermeja
2	20	-74.012	6.994	Yondó
3	17	-73.993	6.981	Yondó
4	16	-73.975	6.918	Yondó
5	16	-74.016	6.945	Barrancabermeja
6	15	-74.116	7.108	Yondó
7	15	-74.265	6.913	Yondó
8	14	-73.926	7.040	Yondó
9	14	-74.030	6.981	Yondó
10	14	-73.926	7.094	Yondó
11	13	-74.170	7.040	Yondó
12	13	-74.021	6.877	Yondó
13	13	-74.211	6.890	Yondó
14	13	-74.016	6.972	Barrancabermeja
15	13	-73.966	6.949	Yondó
16	13	-74.319	6.791	Yondó
17	12	-74.007	6.931	Yondó
18	12	-74.310	6.782	Yondó
19	12	-73.908	7.089	Yondó
20	12	-74.251	6.918	Yondó
21	12	-73.939	7.044	Yondó
22	12	-73.935	7.053	Yondó
23	12	-73.926	7.080	Yondó
24	11	-74.297	6.863	Yondó
25	11	-74.016	6.994	Yondó
26	11	-73.975	6.990	Yondó
27	11	-73.921	7.089	Yondó
28	11	-73.912	7.094	Yondó

Figura 7

Numeración de los Hotspots en Barrancabermeja y Yondó en función de su actividad.



El *Hotspot* con mayor actividad recurrente en el tiempo de estudio presenta por lo menos 21 impactos de rayo por año y se encuentra ubicado en el municipio de Barrancabermeja, mientras que el segundo sitio se encuentra ubicado en Yondó con por lo menos 20 impactos por año. Es importante resaltar que en su gran mayoría los *Hotspots* están ubicados en el casco urbano de Yondó o cercanías a este, en la ribera del río Magdalena justo en la zona que delimita Barrancabermeja y Yondó y en menor medida en zonas boscosas al suroeste del municipio de Yondó. Esto se da como respuesta a la presencia de las cadenas montañosas a los constados de los municipios de estudio, donde se encuentra la Serranía de los Yariguíes, conocida también como Cordillera de los Cobardes, las cuales actúan como barrera natural de los vientos circundantes de

la zona produciendo su ascenso, de esta manera se produce la ionización de las nubes que se genera a partir de la colisión de hidrometeoros suspendidos en la atmosfera y por consiguiente tormentas eléctricas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó (Ardila et al., 2021).

5.2 Distribución mensual y horaria de los impactos de rayo en los Hotspots

En la Figura 8 se muestra la variación temporal de la actividad de rayos en los *Hotspots* ubicados en los municipios de Barrancabermeja y Yondó para el periodo de tiempo comprendido entre el 2014 y 2021, donde se evidencia una disminución de la actividad atmosférica en los últimos 4 años.

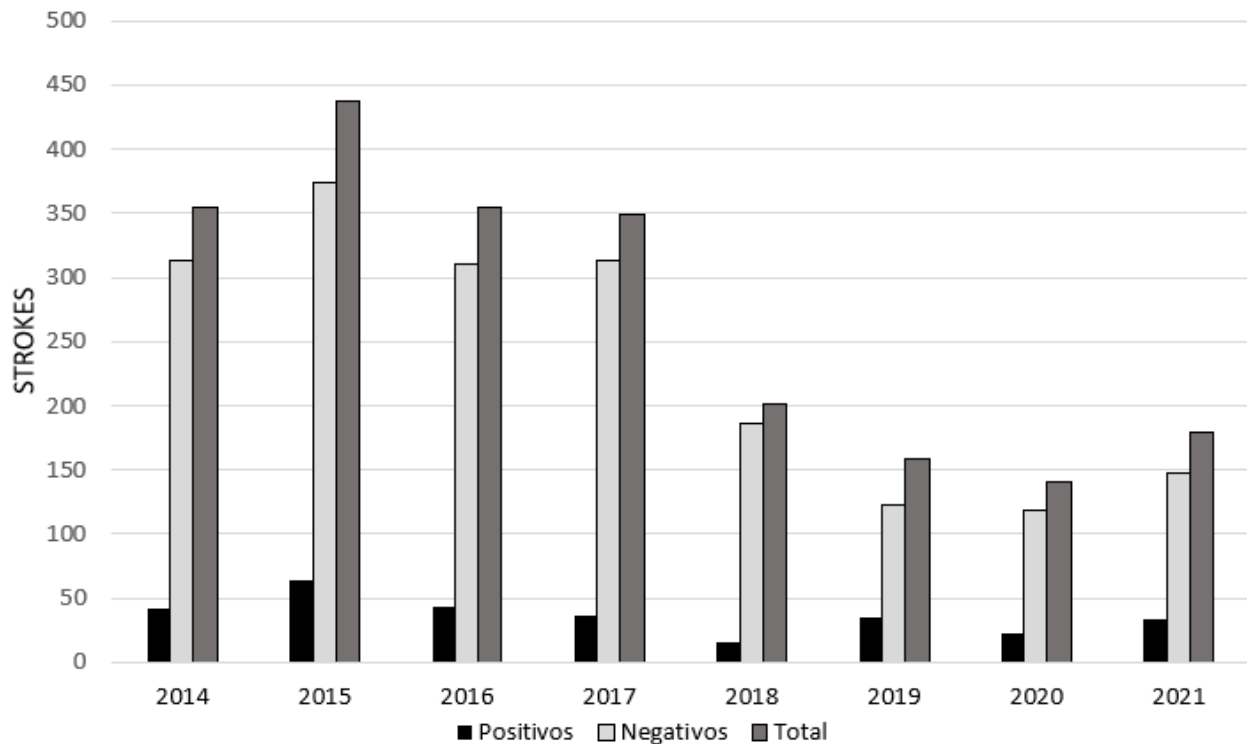
Para el periodo de 2017 a 2018 hubo una reducción de aproximadamente el 57% de los impactos de rayos registrados en los *Hotspots*. Para el 2015 se registró la mayor actividad de rayos con un total de 438 impactos de los cuales 45 fueron presentados en Barrancabermeja y 393 en Yondó, concordando con los resultados arrojados en la determinación de las zonas establecidas como *Hotspot* expuestas en la Tabla 4, en donde se ve una clara tendencia de mayor impacto en el municipio de Yondó.

Los strokes comprendidos en el periodo de 2014 a 2021 que se presentan en los 28 *Hotspot* son en total 2177 de los cuales un 86.6% son de polaridad negativa, concordando con los resultados dados en las investigaciones realizadas en toda Colombia, realizadas por Herrera et al. (2018) donde aproximadamente el 74 % de los impactos son de polaridad negativa teniendo una data de 14 años de impactos nube a tierra. Adicional, se establece una tendencia a nivel mundial mediante estudios realizados en distintos países donde la cantidad de impactos con polaridad de corriente negativa se presentan en mayor cantidad; en Brasil se presenta que el 88.3% de los strokes son de polaridad negativa (Rodger et al., 2004), en China un 86.6% de los strokes son de polaridad

negativa (Saba et al., 2006), en Australia un 91.5 % de los strokes son de polaridad negativa (Rakov, 2006).

Figura 8

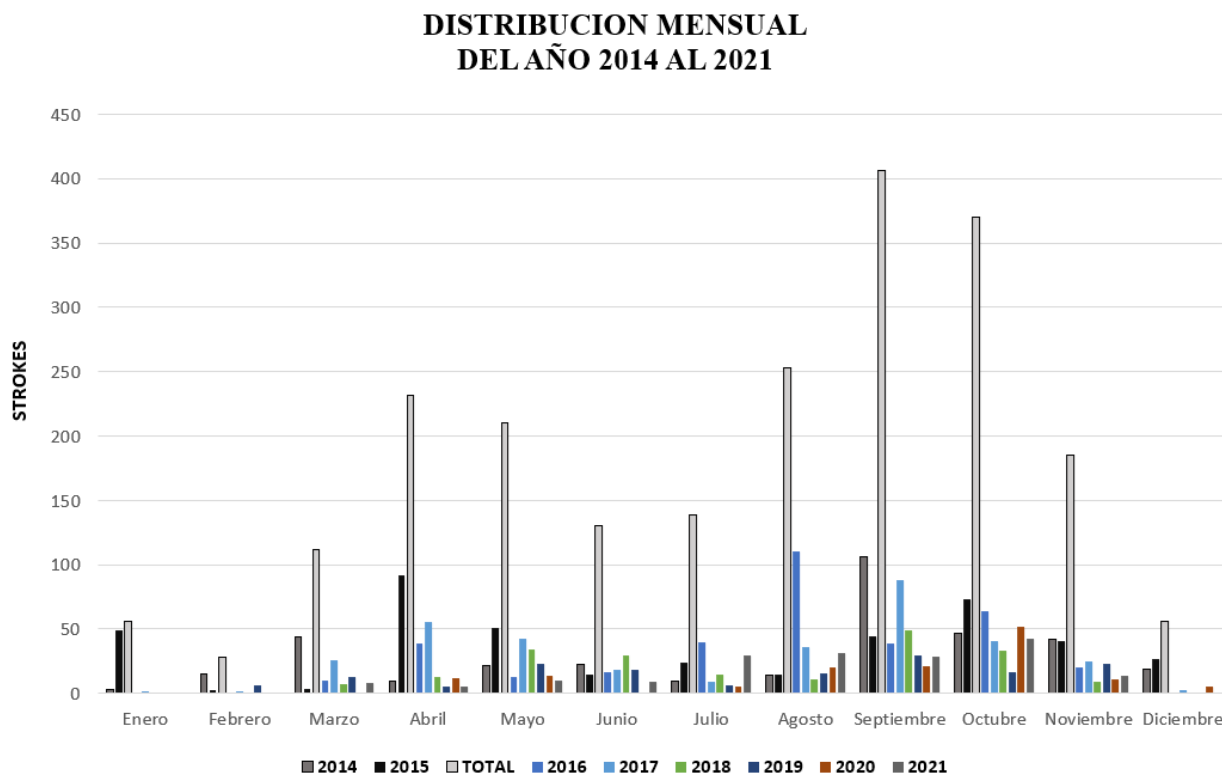
Distribución anual de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021.



La Figura 9 muestra los impactos de rayo registrados mensualmente en los *Hotspots* ubicados en Barrancabermeja y Yondó, en la cual se observa un comportamiento bimodal que presenta picos en la actividad atmosférica en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre; concordando con los meses de mayor precipitación en los departamentos de Santander y Antioquia (IDEAM, s. f.), (*Ideam-Santander*, s. f.). Además, los tres primeros meses mencionados corresponden a los meses tormentosos del año (Ardila et al., 2021), dicho comportamiento se da también gracias una característica típica en la zona de convergencia intertropical ZCIT.

Figura 9

Distribución mensual de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021.



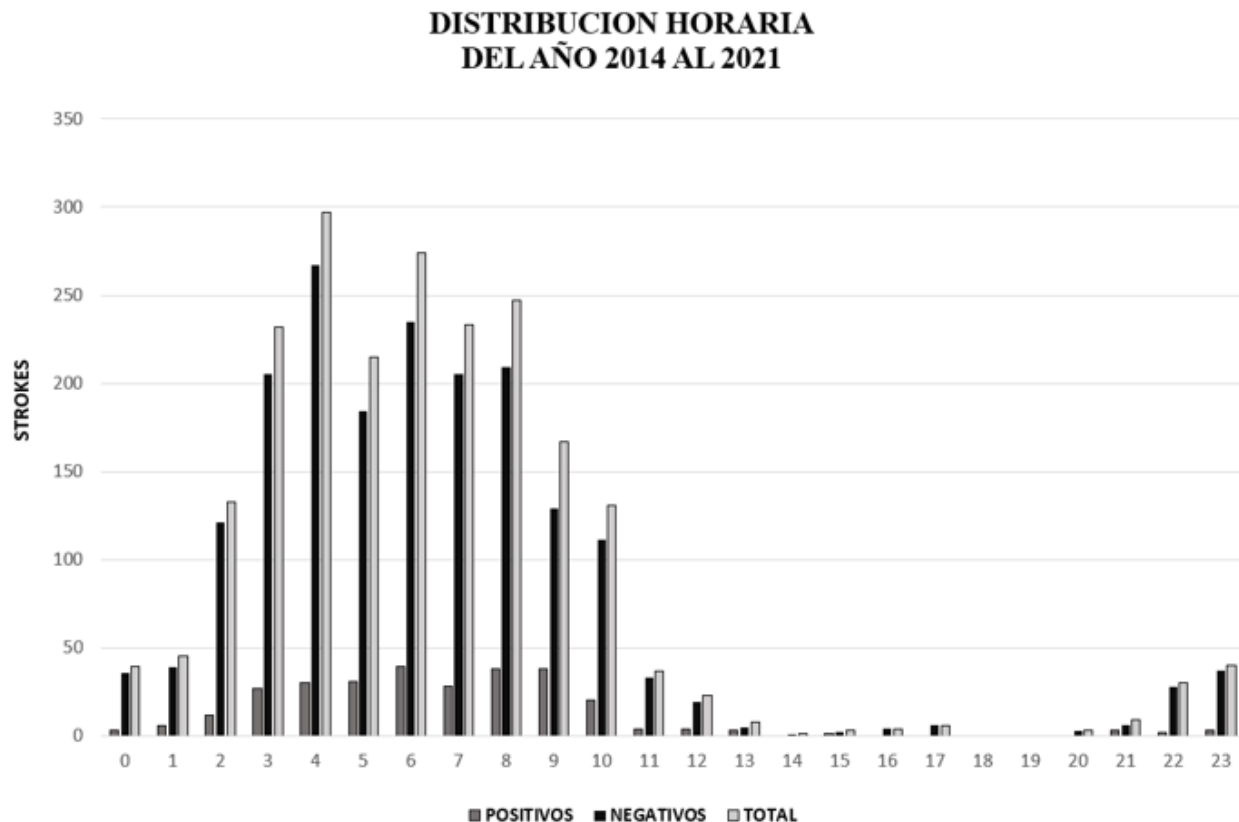
La variación temporal horaria de los impactos de rayos registrados en los 8 años de datos se ilustra en la Figura 10, en la cual se observa un pico en el rango horario de las 3:00 h a las 8:00 h, dando por entendido que la actividad de rayos en los *Hotspots* se presenta de manera recurrente en horarios de la madrugada y de la mañana, donde el 70% de los impactos de rayo en promedio ocurridos durante un día ocurren durante el intervalo horario pico.

También se evidencia una actividad atmosférica mínima entre las 14:00 h hasta las 20:00 h, donde el máximo valor de strokes comprendidos en ese tiempo fue de 6 impactos de rayo. Se presentó una actividad atmosférica de strokes de polaridad negativa nula en los *Hotspots* durante

el periodo de las 18:00 h hasta las 19:00 h, mientras que para las descargas atmosféricas positivas en el periodo de actividad nula estuvo comprendido entre las 16:00 h y las 20:00 h.

Figura 10

Distribución horaria de la actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó de 2014 a 2021.



5.3 Multiplicidad de los impactos de rayos en los Hotspots

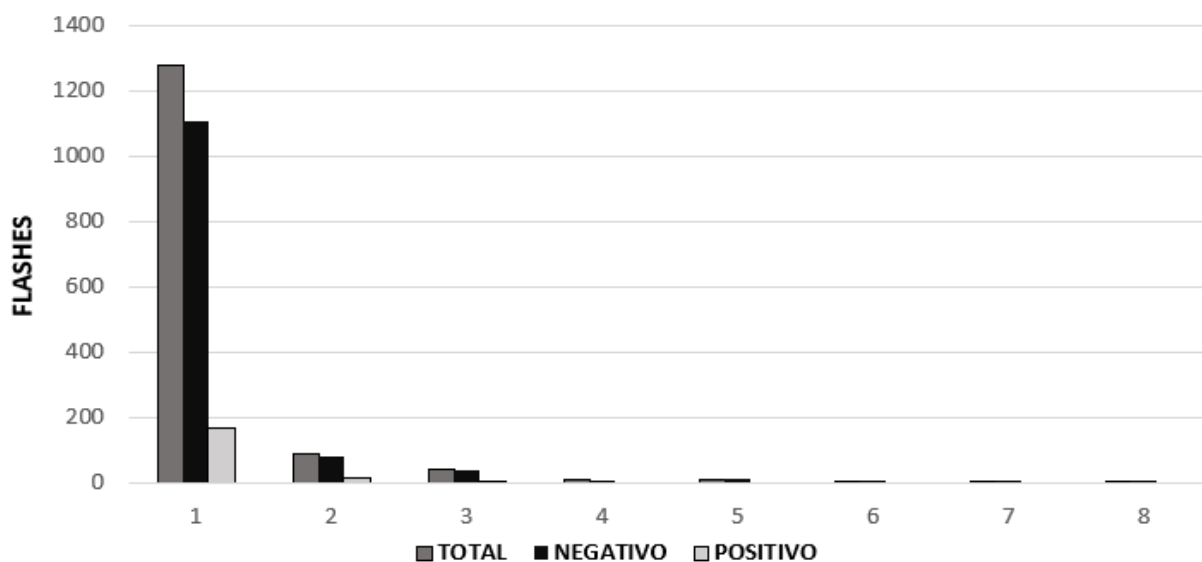
La Figura 11 ilustra el promedio de flashes en los *Hotspots* en función de la multiplicidad, donde un flash está conformado por un conjunto de descargas individuales (strokes) dentro de una estampa de tiempo y distancia establecida (tiempo menor a 1 segundo y distancia menor a 500 metros).

Se obtuvo como resultado del presente estudio que cerca del 90% de los flashes anuales promedio tienen multiplicidad igual a 1, alrededor de un 6% una multiplicidad de 2, y con

multiplicidades de 3 o superior un 4%. En el año 2016 se registró un flash que presentó un total de 7 descargas subsecuentes, el valor más alto registrado en un *Hotspot* para el periodo de tiempo de estudio. Con relación a la polaridad de los flashes registrados en los *Hotspots*, se encontró que 11% de los flashes negativos y un 6.5% de los flashes positivos tienen una multiplicidad igual o superior a 2.

Figura 11

Multiplicidad promedio anual de flashes en Hotspots.



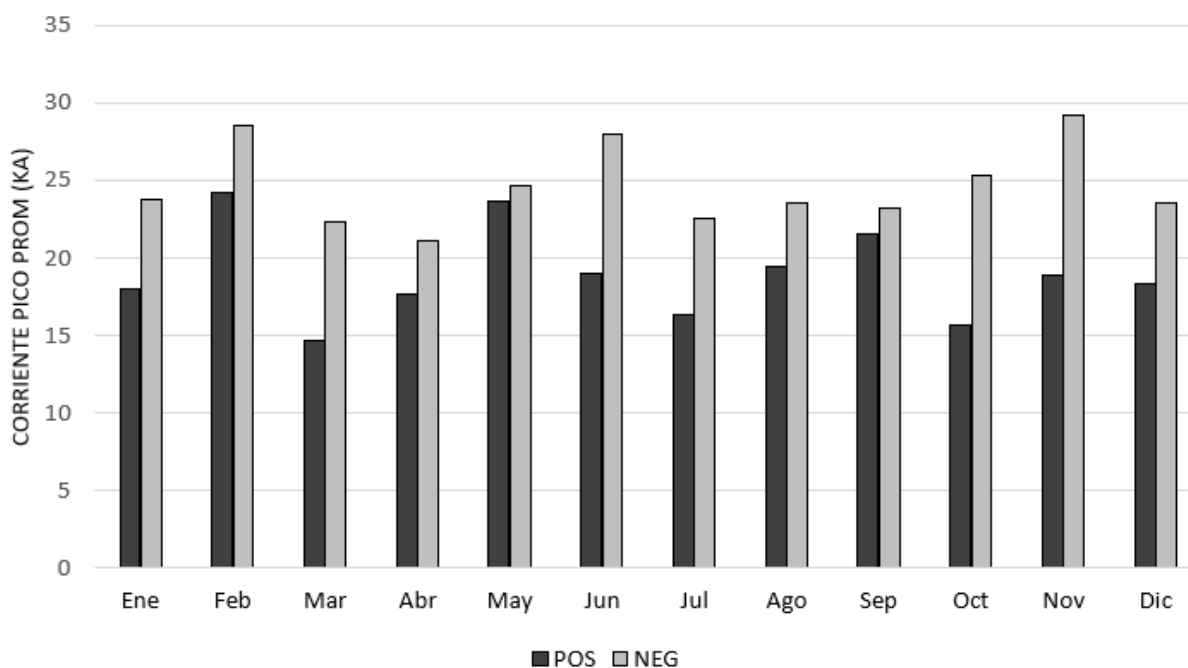
5.4 Corriente pico de la descarga de retorno

El valor medio de las corrientes de descarga de retorno en los *Hotspots* en general es de 23,5 kA; para las descargas positivas el valor medio fue de 18,9 kA donde se presentaron valores picos que van desde los 21,5 a 24,2 kA en los meses de febrero, mayo y septiembre. Para las descargas negativas el rango pico varía entre 27,9 kA a 29,1 kA en los meses de febrero, junio y noviembre, con un valor medio de 24,6 kA. Para la corriente pico anual media de descargas positivas y negativas los valores mínimos fueron de 14,7 y 21,1 kA respectivamente, los datos de

la corriente pico promedio de la descarga de retorno se encuentran ilustrados en la Figura 12. También se observó de manera general en las corrientes pico promedio de descarga de retorno de los strokes en los *Hotspots* que la mitad de estas descargas superaron los 18.4 kA, la mediana. Puntualmente para las descargas positivas se tiene que la mitad de estas estuvieron por debajo de los 14.6 kA, mientras que para las descargas negativas la mitad de los strokes superaron los 19 kA.

Figura 12

Corriente pico promedio de la descarga de retorno mensual



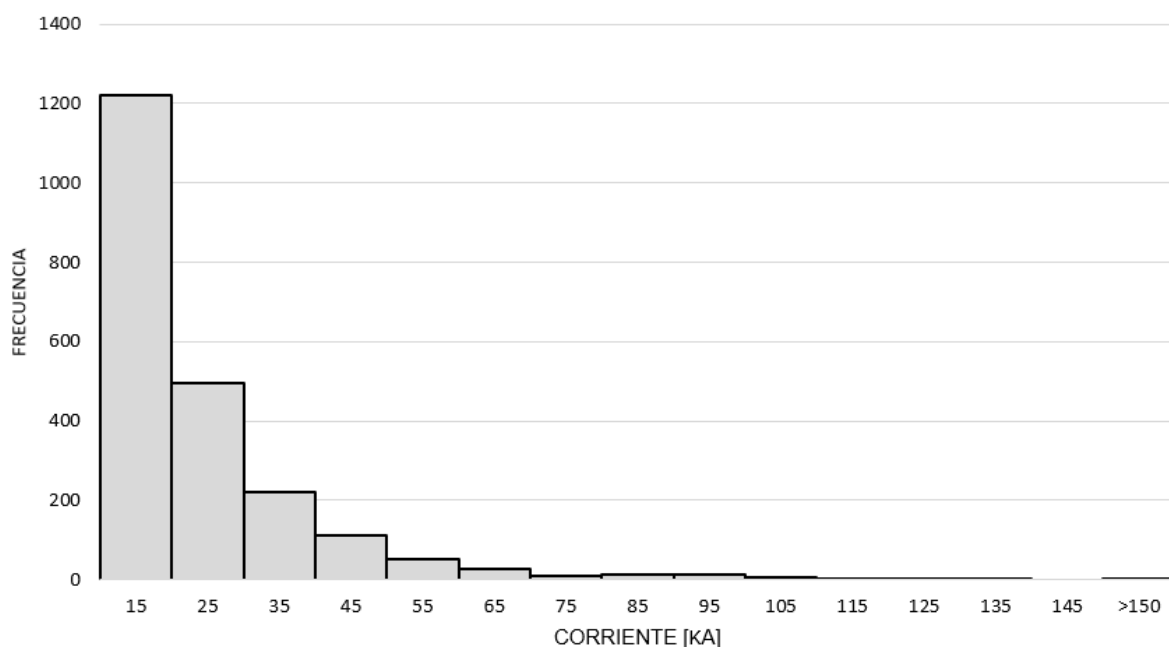
La Figura 13 muestra el histograma de corrientes pico de descarga de retorno para los flashes presentados en los *Hotspots* durante los 8 años de muestreo comprendidos entre el 2014 y 2021 en los municipios de Barrancabermeja y Yondó. Del gráfico se puede inferir que un 56% de los flashes presenta corriente picos con valores entre los 10 y 20 kA, seguidos por alrededor de un 23% de corrientes pico de valores entre los 20 y 30 kA, un 10% con valores entre los 30 y 40 kA,

un 5% para valores entre 40 y 50 kA, alrededor de un 2,5% para corriente entre 50 y 60 kA, un 1% entre 60 y 70 kA y finalmente cerca de un 2,5% para corrientes mayores a 75 kA.

De lo anterior se concluye que la tendencia de las corrientes pico promedio de la descarga de retorno de los strokes en los *Hotspots* se agrupan con menor dispersión en el rango comprendido entre 10 a 50 kA, presentando valores atípicos por encima de los 50 kA. El rango de corrientes que se presentan en los *Hotspots* concuerda con el estudio realizado por Ardila et al. (2021), donde se registró para la corriente pico promedio de la descarga de retorno valores entre 10 y 20 kA en un 58.7%, muy cercano al 56% obtenido; también gran parte de los datos se registraron para los rangos entre 20 a 30kA, 30 a 40kA, 40 a 50 kA con porcentajes de 19%, 9% y 4.8% respectivamente. También la investigación realizada por Herrera et al. (2018), indica que las descargas positivas presentan valores entre 10 a 30 kA en un 75% de los casos y para las descargas negativas valores desde 10 hasta los 30 kA en un 50% corroborando los resultados obtenidos.

Figura 13

Histograma de corriente pico promedio de la descarga de retorno.



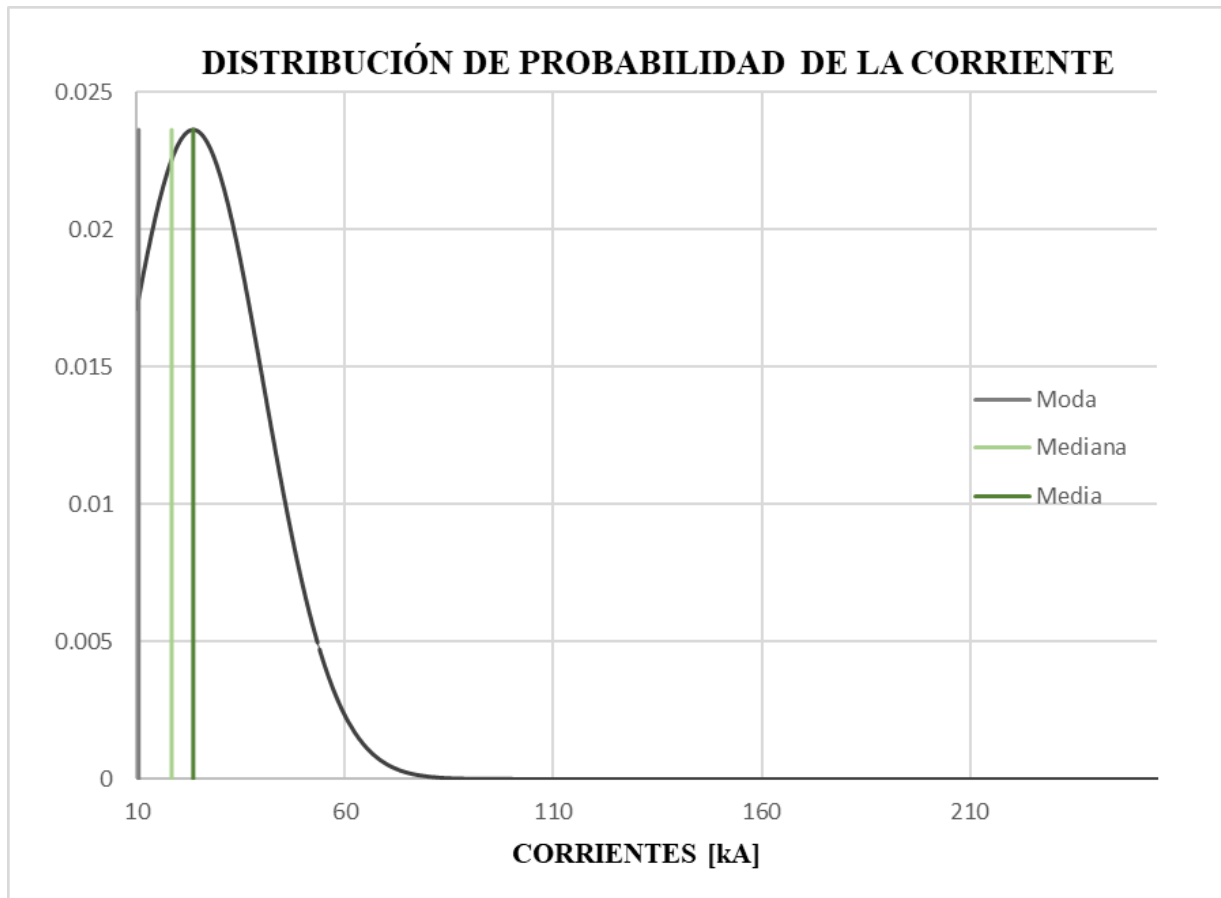
Para profundizar en el análisis estadístico de las corrientes pico promedio de la descarga de retorno en los *Hotspots*, se realiza un Diagrama de Caja y Bigotes mostrado en la Figura 14 con el fin de establecer la tendencia de los datos trabajados, conociendo los valores de la media, mediana y desviación; observando el comportamiento general del parámetro. En cuanto a los rangos observados en el diagrama se tiene un rango intercuartil comprendido entre 13.2 kA hasta los 27.8 kA con un valor de 14.6 kA, con una mediana de 18.4 kA; dada la cercanía de la mediana al primer cuartil y de este al valor mínimo de 10 kA tan grande que se observa y de la gran dispersión de los datos por encima de la mediana, se puede decir que la corriente pico promedio de la descarga de retorno presenta un sesgo positivo o a la derecha.

Se evidencia una presencia considerable de valores outliers por encima de los 49.7 kA hasta los 255.8 kA, no se observan valores outliers inferiores a los 10 kA debido a la restricción en las corrientes que fue aplicado a los datos, con el fin de considerar solo impactos a tierra. Como otra observación se tiene que el 50% de los datos de las corrientes pico promedio en los *Hotspots* presentan valores entre los 13.2 y 27.8 kA, comprendidos entre el primer y tercer cuartil respectivamente. Por otra parte, se tiene una gran dispersión en el 50% de los datos con valores superiores a los 18.4 kA, valor que corresponde a la mediana de los datos. El diagrama de caja y bigotes también muestra que entre el primer y segundo cuartil los datos están menos dispersos comparados con los datos entre el segundo y tercer cuartil. También se evidencia que se presentan valores atípicos de corrientes pico de descarga de retorno bastante altos de hasta 255.8 kA, estos valores tan elevados de corrientes se presentaron en su gran mayoría por descargas positivas, siendo consecuente con la teoría de rayos que sostiene que los strokes de polaridad positiva pueden llegar alcanzar tan altos valores (Uman, 2008), sin embargo, como se mencionó anteriormente el valor medio de la corriente pico para descargas negativas es más alto.

probabilidad de que las corrientes pico de descarga de retorno presenten valores menores a 23.57 kA.

Figura 15

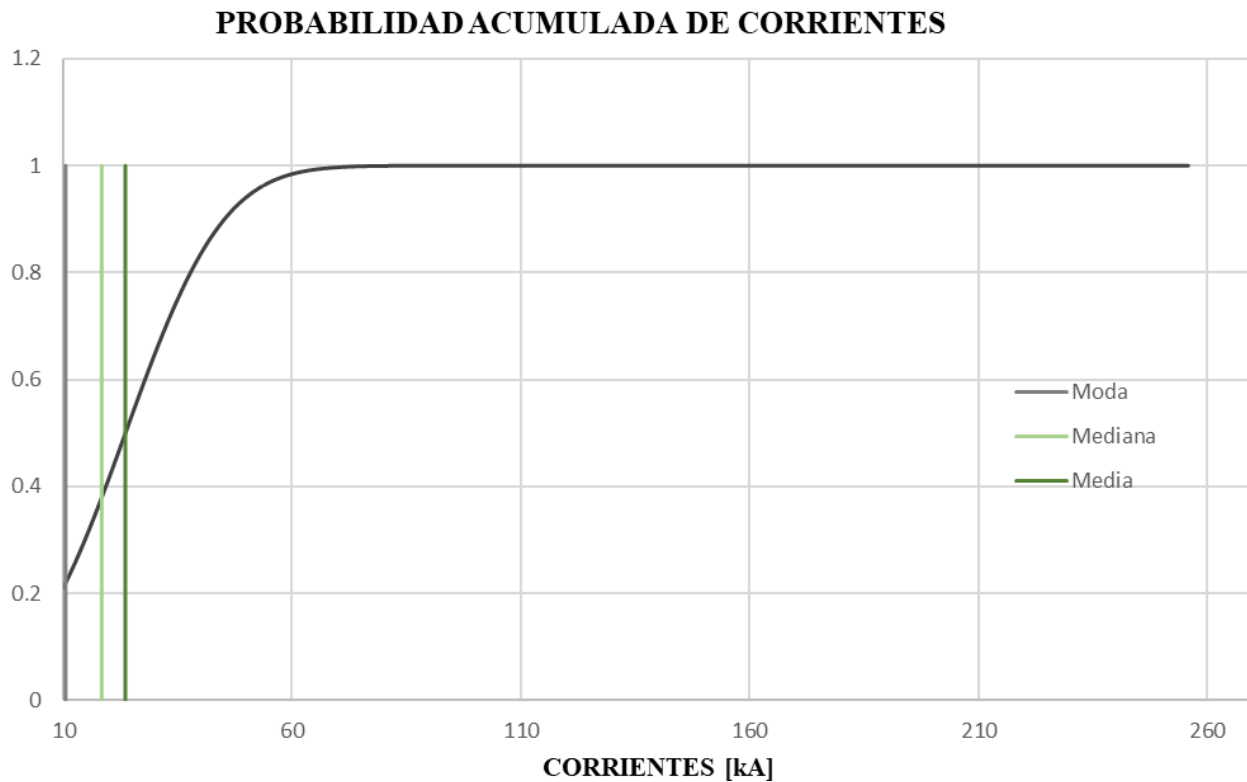
Distribución de probabilidad de la corriente.



En la Figura 16 se establece la curva de probabilidad acumulada de la corriente, donde se evidencia un 50% de los datos corresponden a corrientes con valores mayores a 18.4 kA. Dada la gran dispersión que presentan los valores de corriente, la mediana representa de una mejor manera la tendencia central de los datos.

Figura 16

Probabilidad acumulada de la corriente.



5.5 Correlación entre la metodología espacial y la metodología temporal

La determinación de sitios de alta actividad de rayos se puede realizar mediante metodologías espaciales y temporales. Debido a la alta actividad de rayos de la zona de estudio, no es frecuente que los valores de Densidad de Descargas a Tierra (DDT) de un sitio o una estructura elevada sobrepase la media de la región, por lo que resulta difícil ubicar *Hotspots* usando análisis espaciales. Por lo anterior, estos sitios se determinan evaluando la ocurrencia temporal que estudia la recurrencia en la actividad de rayos en un sitio determinado.

En Colombia los sitios de alta actividad de rayos se han determinado con base en la ocurrencia espacial de descargas nube-tierra a través de parámetros como la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), elaborando mapas de calor dada la intensidad del parámetro que

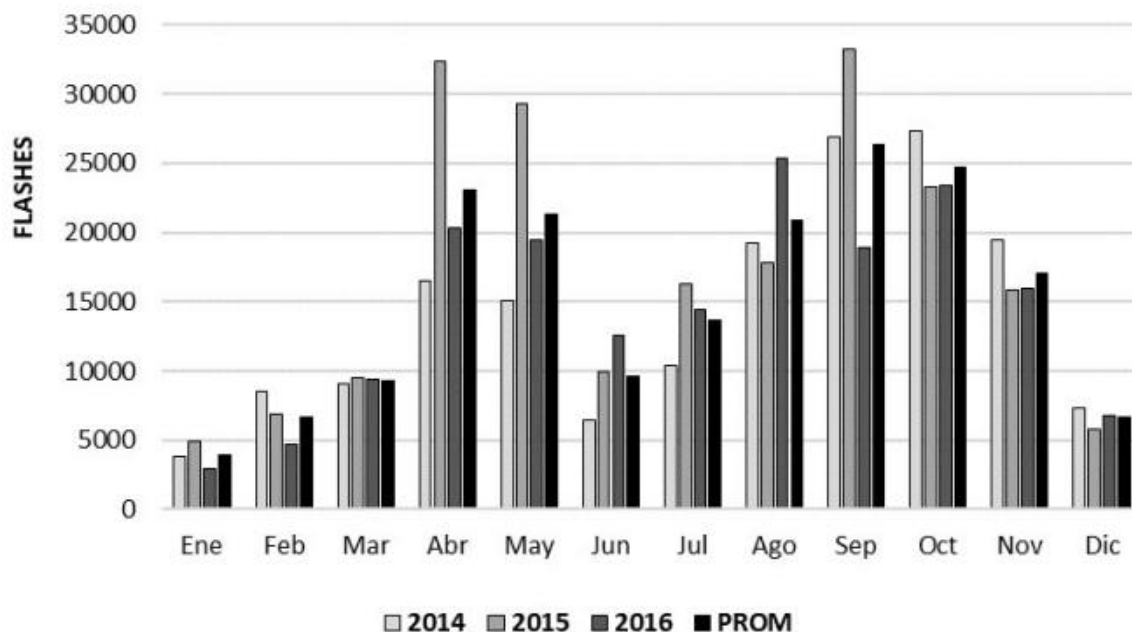
permite identificar la intensidad de la actividad atmosférica a lo largo del territorio nacional (Aranguren, 2013). Aranguren (2013) evidenció que los municipios de estudio presentan un valor alto de DDT, lo cual se debe a la influencia de la orografía; adicionalmente Ardila et al. (2021) realizó un mapa de DDT actualizado, por medio del cual se concluye que los municipios a las riberas del río Magdalena poseen una mayor actividad atmosférica debido a que se encuentran al costado de la Serranía de los Yariguíes, como es el caso de Yondó y Barrancabermeja, este último con un valor de DDT mayor a $25 \text{ flashes}/\text{km}^2/\text{año}$.

Para identificar las diferencias en el comportamiento de la actividad atmosférica entre los sitios de alta actividad de rayos determinados por la metodología temporal (los 28 *Hotspots* determinados en el presente estudio) y los determinados por la metodología espacial (el departamento de Santander por su alto valor de DDT) se analizan los resultados obtenidos en el artículo realizado por Ardila et al. (2021) donde utilizan la metodología espacial con base en el parámetro de la DDT.

La distribución mensual presentada por Ardila et al. (2021), dio como resultado que la actividad de rayos en cada mes en los municipios de Barrancabermeja y Yondó presentaron el comportamiento mostrado en la Figura 17, de la cual se puede decir que coincide con la distribución mensual determinada en el presente estudio, presentando un comportamiento bimodal con mayor actividad atmosférica en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre.

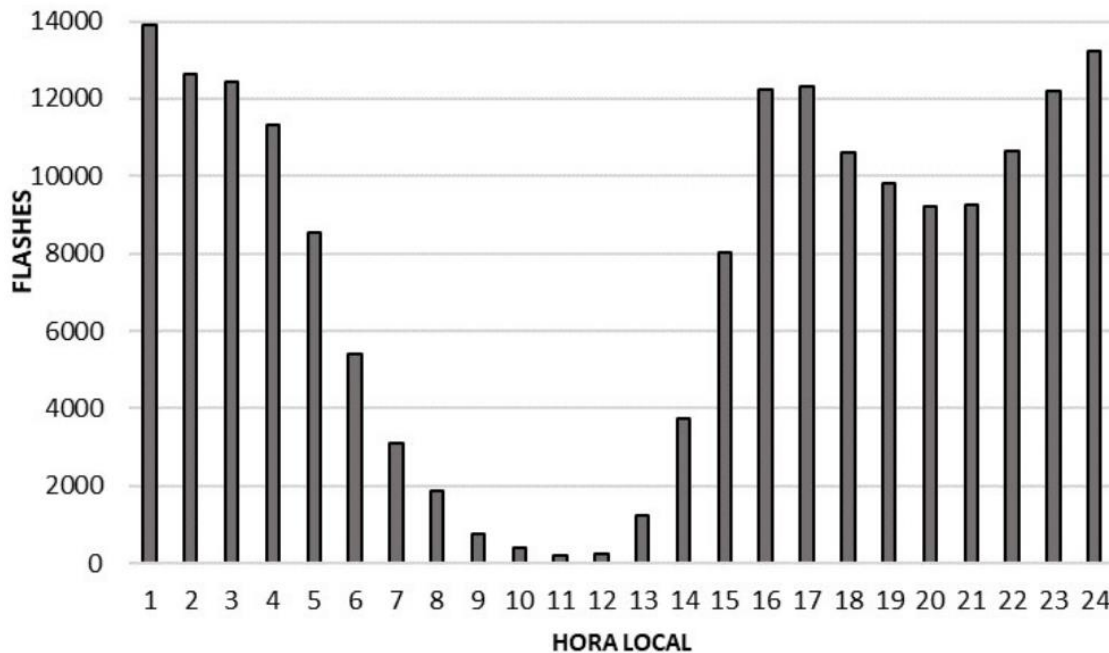
Figura 17

Distribución mensual en Hotspots obtenida del estudio en comparación.



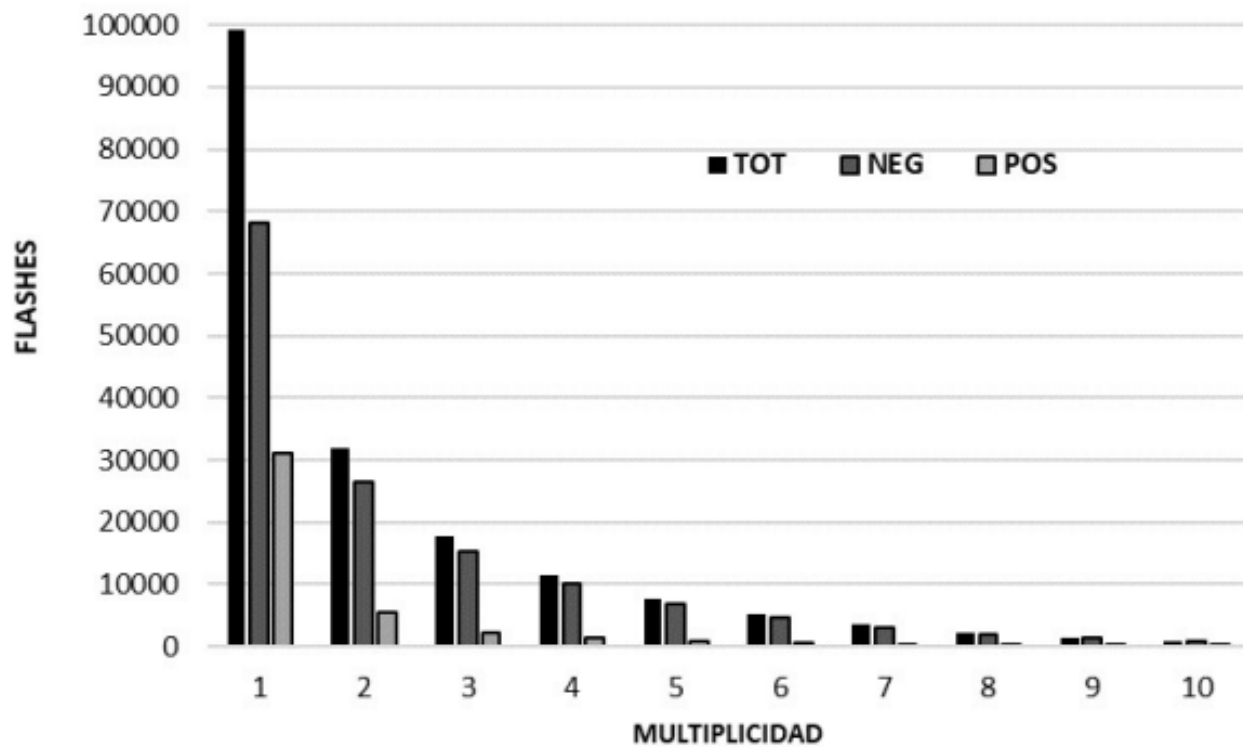
Nota. Tomada de Ardila et al., 2021.

En cuanto a la distribución horaria determinada por Ardila et al. (2021) para la actividad de rayos en Santander, mostrada en la Figura 18, con respecto al presente estudio, se observa que el comportamiento no corresponde con la variación temporal horaria de la actividad atmosférica obtenida (ver Figura 10), debido a que la distribución horaria determinada por Ardila et al. (2021) presenta 2 horarios pico en la actividad atmosférica, el primer periodo de tiempo comprendido entre las 16:00 y las 18:00 h, y el segundo entre las 23:00 y las 3:00 h, es en el primer periodo de tiempo en el cual existe la mayor diferencia porque el horario donde menos actividad de rayos se registra en los *Hotspots* ubicados en los municipios de Barrancabermeja y Yondó que se determinaron con base en la metodologías temporal es justamente en el horario de las 16:00 a las 18:00 h.

Figura 18*Distribución horaria en Hotspots.*

Nota. Tomada de Ardila et al., 2021.

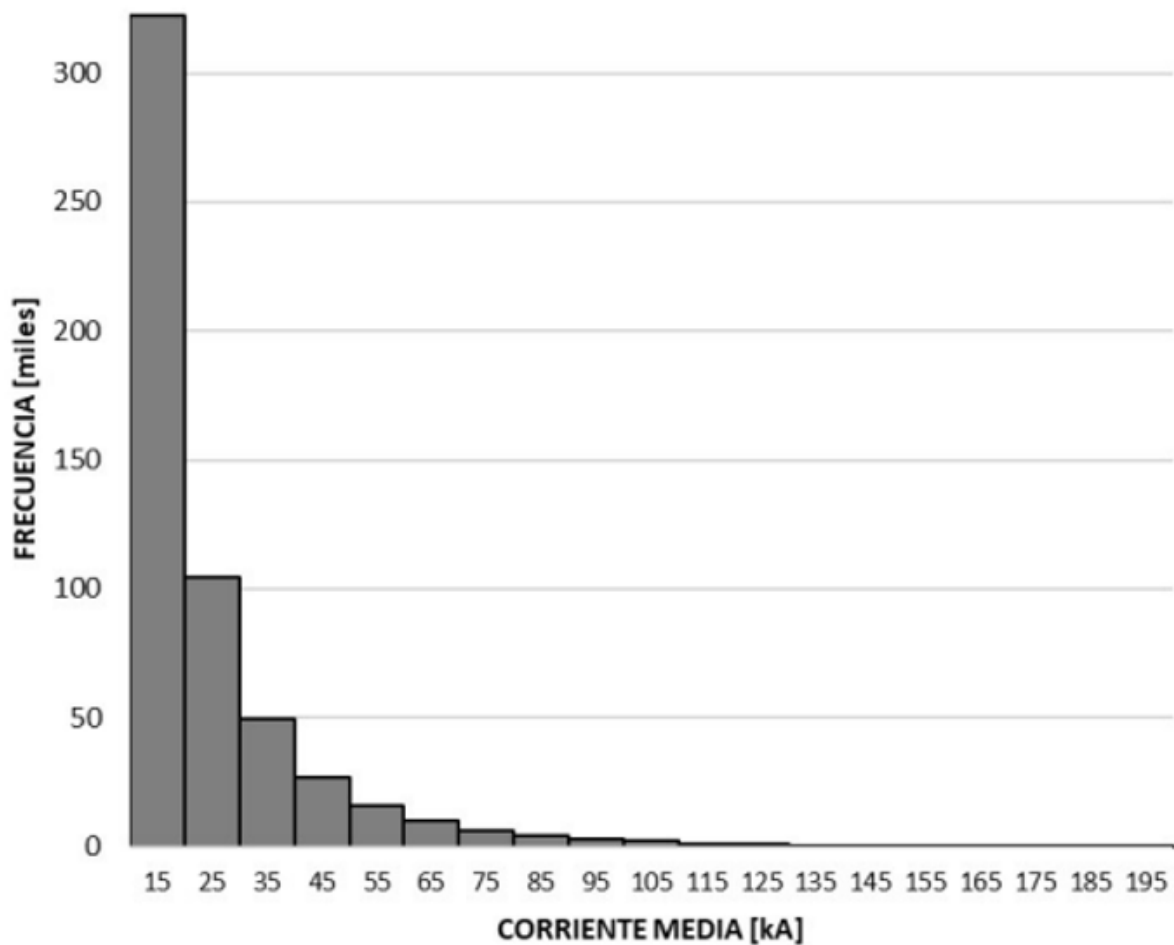
La multiplicidad de los flashes de la actividad atmosférica en la totalidad del departamento de Santander determinada por Ardila et al. (2021) se muestra en la Figura 19, en esta se estableció que un 54% de los flashes tiene como multiplicidad un valor de 1, tanto para descargas con polaridad positiva como en descargas con polaridad negativa. Además, Ardila et al. (2021) encontraron que un 46% de los flashes presentaron valores de multiplicidad mayores a 1, lo que representa que casi la mitad de los flashes tienen multiplicidades mayores o iguales a 2. En comparación con la multiplicidad de los flashes obtenidos en los *Hotspots* del presente estudio se puede establecer que no coinciden con multiplicidades mayores a 1, pues los flashes que presentan dicha característica solo representan un 10% de los encontrados en la investigación realizada.

Figura 19*Multiplicidad de flashes en Hotspots.**Nota.* Tomada de Ardila et al., 2021.

Las corrientes pico promedio de la descarga de retorno determinadas por Ardila et al. (2021) en el departamento de Santander se muestran en la Figura 20, de la cual se puede observar que la mayoría de corrientes presentadas en el departamento de Santander oscilan en el rango entre 10 a 50 kA, coincidiendo con el rango de las corrientes pico promedio registradas en los *Hotspots* ubicados en los municipios de Barrancabermeja y Yondó mostrados en la Figura 13.

Figura 20

Corriente pico promedio de la descarga de retorno.



Nota. Tomada de Ardila et al., 2021.

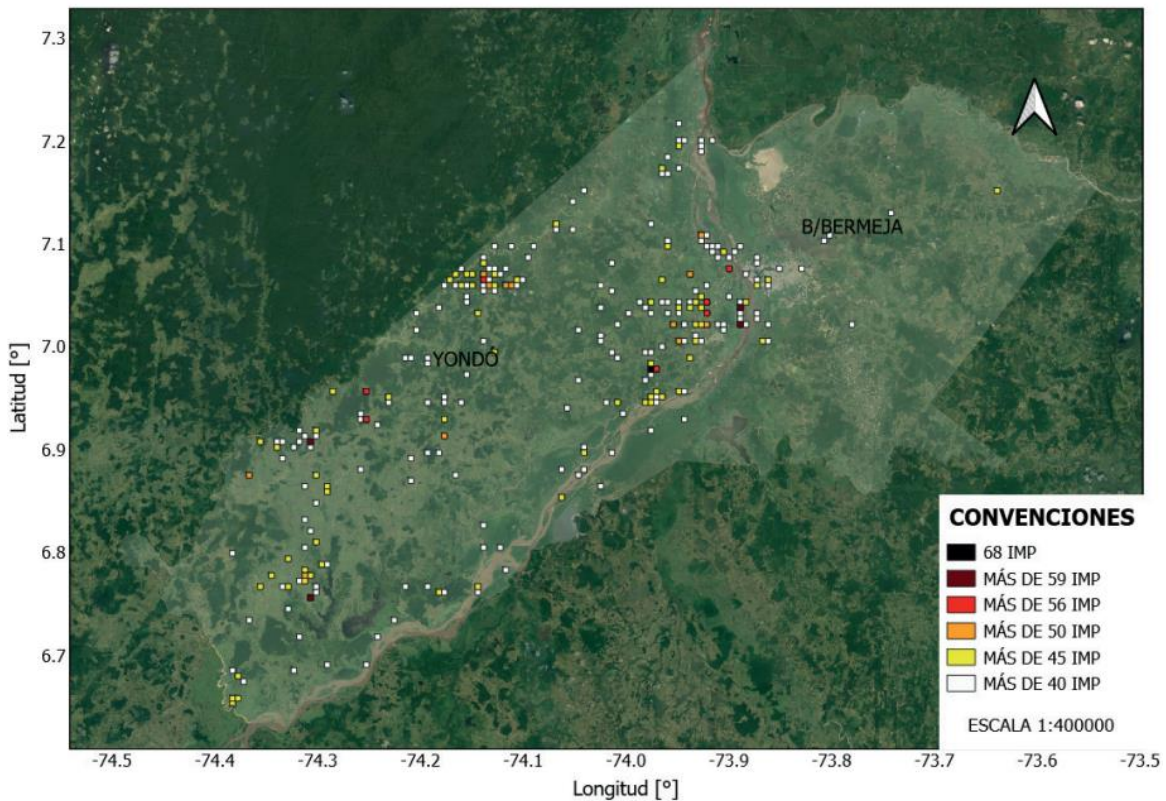
Con el fin de corroborar la ubicación geográfica de los *Hotspots* obtenidos como resultado de la presente investigación, se hizo una comparativa con el artículo realizado por Ardila & Soto (2022), donde se determinaron los sitios de alta actividad de rayos en Barrancabermeja y Yondó con una metodología con base a la ocurrencia temporal para el periodo de tiempo comprendido entre enero del 2016 y febrero del 2020.

En la Figura 21 se muestran los sitios de alta actividad de rayos que fueron determinados por Ardila & Soto (2022), el cual dio como resultado 269 *Hotspots* en los dos municipios, 34 en Barrancabermeja y 235 en Yondó, cada uno de estos con más de 40 impactos de rayo. En comparación con el proyecto actual que tuvo un total de 28 *Hotspots* para los dos municipios, se evidencia una gran diferencia en el número de *Hotspots* hallados. Lo anterior es debido a una razón muy importante, la cual corresponde a que Ardila & Soto (2022) no consideraron la recurrencia sino el promedio de rayos, lo que da lugar a encontrar muchos más sitios con alta actividad. Así mismo, Ardila & Soto (2022) establecieron cuadrados de 600 metros de lado mientras que en el presente estudio fueron de 500 metros, de esta forma el estudio por Ardila & Soto (2022) genera un mayor margen de incidencia de impactos de rayo en cada uno de los sitios, dando lugar a encontrar más *Hotspots*; A diferencia de los 5 años comprendidos entre el 2016 y 2020 en el estudio realizado por Ardila & Soto (2022), el presente estudio estableció como criterio de selección aquellos sitios en los cuales su actividad atmosférica se mantuviera constante durante 8 años, del 2014 al 2021, reduciendo así significativamente el número de sitios que cumplieran con las condiciones de recurrencia en el tiempo establecidas.

Lo mencionado anteriormente influye también en la actividad de impactos de rayo registrada en los *Hotspots*, donde en el presente estudio tiene como máximo una actividad atmosférica no mayor a 21 impactos de rayo registrada en los *Hotspots*, el estudio en comparación llegó a determinar *Hotspots* de hasta 68 impactos.

Figura 21

Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.



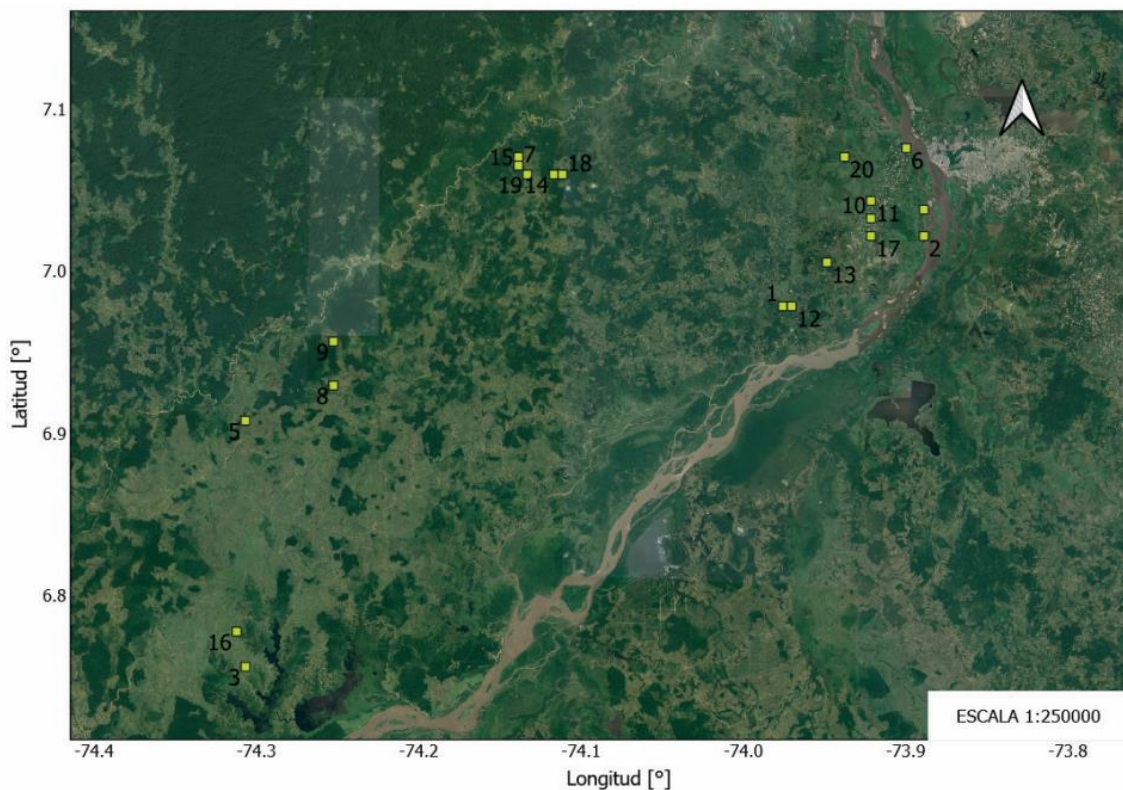
Nota. Tomada de Ardila & Soto, 2022.

En la Figura 22 se muestran los principales *Hotspots* obtenidos por Ardila & Soto (2022) los cuales corresponden a los 20 sitios de mayor actividad con un rango de impactos de rayo comprendido entre 52 a 68 impactos de rayo. Al comparar la Figura 6 con la Figura 22 a pesar de que las ubicaciones no coinciden exactamente, si se logra observar una similitud en la ubicación geográfica de los *Hotspots*, en ambos casos, se encuentran ubicados principalmente en el casco urbano de Yondó o en cercanías a este, también cerca al río Magdalena, y en las zonas boscosas al suroeste del municipio de Yondó. Es de importancia mencionar que todos los principales *Hotspots* determinados por Ardila & Soto (2022) se encuentran en el municipio de Yondó, mientras que

para el presente estudio se encontraron 3 *Hotspots* en el municipio de Barrancabermeja. Es posible que no se hayan determinado *Hotspots* en el municipio de Barrancabermeja debido a que la alta actividad de rayos que se estableció como criterio de selección determinados por Ardila & Soto (2022) debía ser superior a 40 impactos de rayo; mientras que para el presente estudio, a pesar de si tener en cuenta la actividad de rayo se priorizó su recurrencia, pues se estableció como criterio de selección sobre los *Hotspots* tener como mínimo más de 10 impactos de rayos, pero que esta actividad se mantuviera en cada uno de los años del periodo de estudio: otra razón por la cual se da la diferencia es debido a la evolución arquitectónica la cual se ve reflejada en edificios o líneas de transmisión que no estaban presentes en años correspondientes a 2014 y 2015.

Figura 22

Principales Hotspots en Barrancabermeja y Yondó.



Nota. Tomada de Ardila & Soto, 2022.

Para terminar con la comparativa en la ubicación de los *Hotspots* se realizan las Figuras 23 y Figuras 24. Mediante el programa QGIS se ubicaron las estructuras elevadas presentes en los municipios de Barrancabermeja y Yondó (como torres de telecomunicaciones, líneas de transmisión y algunos edificios) y los *Hotspots* determinados en el presente estudio con el fin de observar alguna coincidencia, en donde *Hotspot* correspondiera a una estructura elevada, y como resultado no se tuvo ninguna coincidencia entre estos.

Figura 23

Hotspots en Barrancabermeja y Yondó coincidentes con estructuras elevadas.

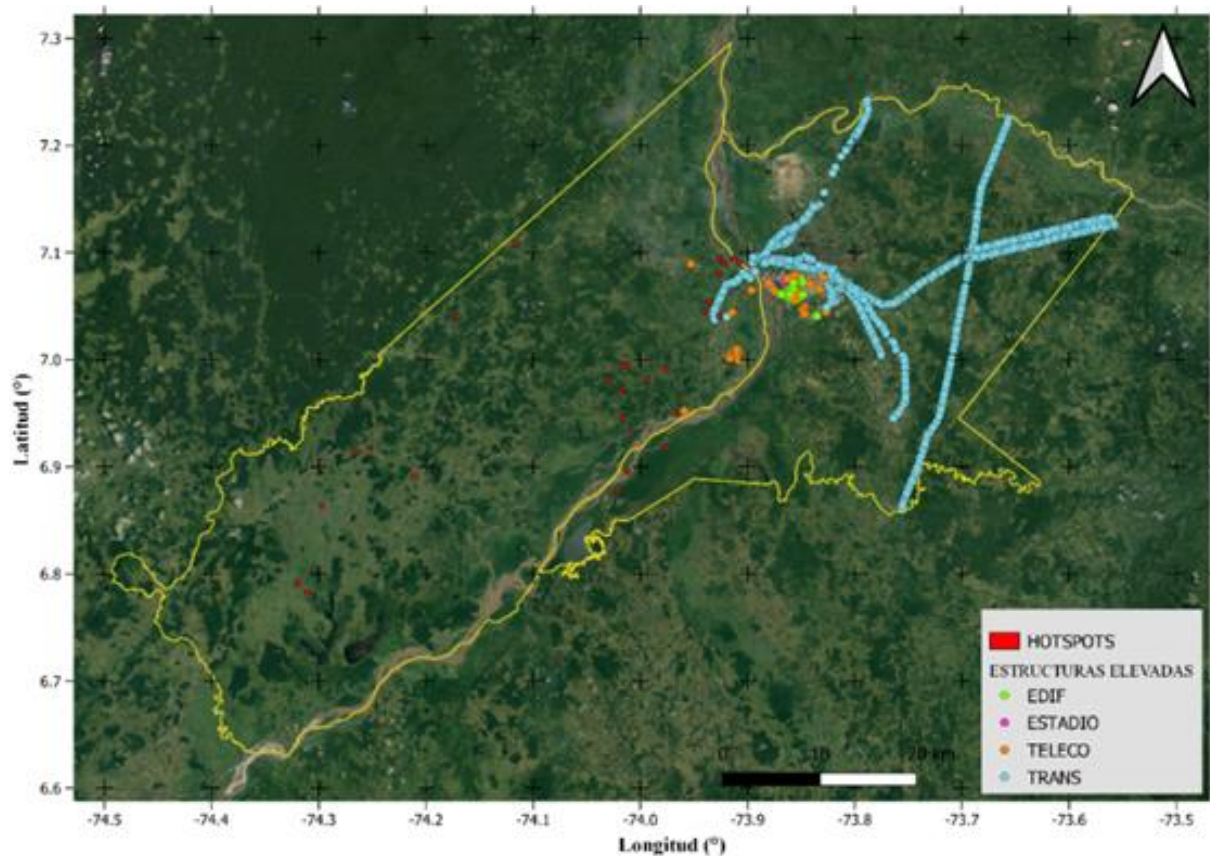
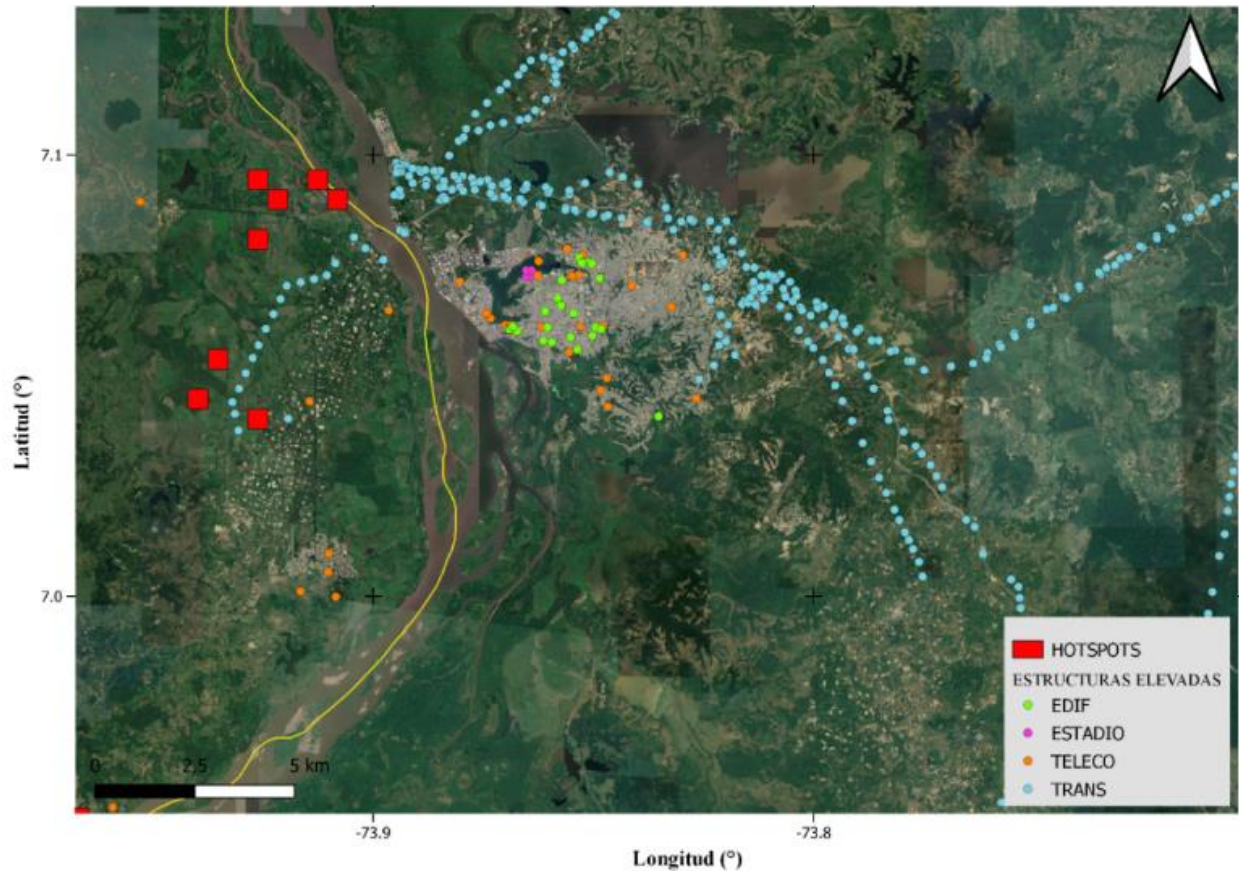


Figura 24

Comparativa de la coincidencia de Hotspots en estructuras elevadas.



De manera general de los 28 *Hotspots* en total localizados por medio de la metodología utilizada, 25 se encuentran ubicados en el municipio de Yondó y 3 en Barrancabermeja, es entonces evidenciable que en la Figura 7 en el municipio de Yondó se ubican la gran mayoría de *Hotspots* hallados en el presente estudio, concordando así con los *Hotspots* obtenidos por Ardila & Soto (2022) en donde se presenta también una mayor presencia de estos sitios de alta actividad de rayos en el municipio de Yondó comparado con Barrancabermeja.

6. Conclusiones

Los *Hotspots* se encuentran en su mayoría distribuidos en el casco urbano de Yondó o en cercanías a este, cerca al río Magdalena, y en las zonas boscosas al suroeste del municipio de Yondó.

La actividad atmosférica mensual en *Hotspots* presenta un comportamiento bimodal con valores picos en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre.

El rango horario de mayor actividad atmosférica en un Hotspot ocurre entre las 3:00 a.m. a 8:00 a.m.

El 90% de los flashes en los *Hotspots* presentan multiplicidad de uno (único impacto).

Los resultados encontrados permiten el diseño de protecciones contra rayos en estas zonas debido que se encuentran los sitios de alta actividad de rayo, los parámetros del rayo en estos sitios y la distribución de corriente.

Referencias Bibliográficas

- Albrecht, R., Goodman, S., Buechler, D., Blakeslee, R., & Christian, H. (2016). Where Are the Lightning Hotspots on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11), 2051-2068. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Aranguren. (2013). Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risk for power systems. *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL*, 7. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/view/40914>
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., & Betz, H. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 154, 182-189. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010>
- Ardila, B., & Soto, E. (2022). Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó. *Tecnura*, 26(73), Article 73. <https://doi.org/10.14483/22487638.17679>
- Ardila, B., Soto, E., Velandia, K. (2021). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería*, 26(3), 419-435. <https://doi.org/10.14483/23448393.17585>
- ASALE, R.-, & RAE. (s. f.). *Pluviosidad / Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Recuperado 20 de enero de 2023, de <https://dle.rae.es/pluviosidad>
- Betz, H., Schmidt, K., Fuchs, B., Oettinger, W., & Höller, H. (2007). *Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning measured in the VLF/LF Regime*. 2. https://elib.dlr.de/50985/1/Volume_2_2007-2.pdf

- Boccippio, D., Goodman, S., & Heckman, S. (2000). Regional Differences in Tropical Lightning Distributions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39(12), 2231-2248.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<2231:RDITLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<2231:RDITLD>2.0.CO;2)
- Christian, H., Blakeslee, R., Boccippio, D., Boeck, W., Buechler, D., Driscoll, K., Goodman, S., Hall, J., Koshak, W., Mach, D., & Stewart, M. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), ACL 4-1-ACL 4-15.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002347>
- Conseil international des grands réseaux électriques (Ed.). (2013). *Lightning parameters for engineering applications*. CIGRÉ.
- Cruz, A., Torres, H., Aranguren, H., & Inampué, J. (2018). Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 – 2014. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), Article 2.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018006>
- Doswell, C. (2001). *Severe Convective Storms* / AMS Bookstore.
<https://bookstore.ametsoc.org/catalog/book/severe-convective-storms>
- Guzmán, D., Ruíz, J., & Cadena, M. (2014). *REGIONALIZACIÓN DE COLOMBIA SEGÚN LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL, A TRAVÉS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)*.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119>
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009>

- Höller, H., Betz, H., Schmidt, K., Calheiros, R., May, P., Hounninou, E., & Scialom, G. (2009). Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(20), 7795-7824. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7795-2009>
- Ideam. (s. f.). *CARÁCTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS*.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%20C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%20C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- IDEAM. (s. f.). *VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ*. Recuperado 19 de enero de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz#:~:text=Es%20el%20nevado%20m%20C3%A1s%20septentrional,de%20Bogot%C3%A1%20en%20d%C3%ADas%20despejados>.
- Ideam-Santander*. (s. f.). Recuperado 31 de enero de 2023, de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/santander_texto.pdf
- Keraunos S.A.S. (2016). *RED COLOMBIANA DE DETECCIÓN TOTAL DE RAYOS - LINET*.
[https://16557801101891546621.googlegroups.com/attach/610c7f091a9ac/Red%20Colombiana%20de%20Localicaci%C3%B3n%20de%20rayos%20LINET%20\(2016\)_01.pdf?part=0.2&vt=ANaJVrFpgQaCXNhdev6Haw9uhERjjDoGo8gA02Y7i9u3J9KJfYYPW9v_ds_wbtB1zIElu-tffEGSigdRqH73mEfZV4iJAY018oKMAte_ShdSSrWPom2xTpwKc](https://16557801101891546621.googlegroups.com/attach/610c7f091a9ac/Red%20Colombiana%20de%20Localicaci%C3%B3n%20de%20rayos%20LINET%20(2016)_01.pdf?part=0.2&vt=ANaJVrFpgQaCXNhdev6Haw9uhERjjDoGo8gA02Y7i9u3J9KJfYYPW9v_ds_wbtB1zIElu-tffEGSigdRqH73mEfZV4iJAY018oKMAte_ShdSSrWPom2xTpwKc)
- NASA. (s. f.). Lightning Imaging Sensor (LIS). *Lightning Space Search and Observations*.
https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/overview_lis_instrument.html

- Rakov, V. (2006). Lightning: Phenomenology and Parameters Important for EMC. *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, 283-288.
<https://doi.org/10.1109/CEEM.2006.257954>
- Rodger, C., Brundell, J., Dowden, R., & Thomson, N. (2004). Location accuracy of long distance VLF lightning location network. *Annales Geophysicae*, 22(3), 747-758.
<https://doi.org/10.5194/angeo-22-747-2004>
- Saba, M., Ballarotti, M., & Pinto Jr., O. (2006). Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D3). <https://doi.org/10.1029/2005JD006415>
- Sánchez, H. (1991). Los rayos: Una visión mitológica, científica y tecnológica. *Ingeniería e Investigación*, 24, Article 24. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n24.20701>
- Torres, H., & Castaño, O. (1991). Las series de tiempo en la investigación espacio-temporal sobre descargas eléctricas atmosféricas en Colombia. *Revista Colombiana de Estadística*, 12(23-24), Article 23-24. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/estad/article/view/9957>
- Uman, M. (2008). *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511585890>
- Younes, C. (2020). Caracterización de parámetros del rayo en Colombia con base en sistemas de localización terrestres y satelitales, 20 años de análisis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 960-973.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1171>