

Copyright © 2019

[This article is published under the terms of the Attribution-ShareAlike 4.0 International \(CC BY-SA\)](#)



<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/1116>

DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.17679>

Clasificación del artículo: **Investigación**

**Metodología para identificar zonas y estructuras
elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en
Barrancabermeja-Yondó**

**Methodology to identify areas and elevated structures
with the greatest amount of lightning impacts in
Barrancabermeja-Yondó**

Fecha de recepción: 01 de Marzo de 2021

Fecha de aceptación: 20 de Abril de 2022

Cómo citar: Ardila-Murillo., B.E. y Soto- Ríos., E.A. (2022). *Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó. Tecnura*, 26(73). [https://doi.org/ 10.14483/22487638.17679](https://doi.org/10.14483/22487638.17679)

Brandon Steven Ardila Murillo

Ingeniero electricista. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: brandon2208141@correo.uis.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9805-7245>

Edison Andrés Soto Ríos

Ingeniero electricista; magíster en Ingeniería Eléctrica, y doctor en Ingeniería – Línea Automática, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Contacto: easotor@uis.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6039-1769>

(T2) Resumen

Objetivo: Este trabajo presenta una metodología para determinar los sitios y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo (*hotspots*) en Barrancabermeja y Yondó.

Metodología: Se parte de la división de la superficie de estos dos municipios en polígonos de 600 metros. De esta forma, a través de la información de actividad de rayos (impactos

nube-tierra) proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos - LINET entre enero de 2016 y febrero de 2020, se determinó el número de impactos por polígono, lo que permitió identificar los *hotspots* en las zonas de estudio. Así mismo, se identificaron y localizaron estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones, y se estableció para cada una de ellas un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización de la Red LINET, de esta manera se determinaron las 20 estructuras con mayor número de impactos de rayo.

Resultados: Se encontraron los polígonos con mayor actividad de rayos, de los cuales 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de *densidad de descargas a tierra* hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó de las cuales se escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50 % a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio con un total de 68 impactos.

Conclusiones: De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja se hallaron 10 estructuras elevadas en un *hotspot*, de las cuales 7 están en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que, en este municipio, el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas si aumentan la actividad de rayos.

Financiamiento: Universidad Industrial de Santander.

Palabras clave: descargas atmosféricas, densidad de descargas a tierra (DDT), nivel cerámico (NC), estructuras elevadas, *hotspots*, Red LINET.

Abstract

Objective: This paper presents a methodology to determine the zones and elevated structures with the highest number of lightning strikes (Hotspots) in Barrancabermeja and Yondó.

Methodology: It starts from the division of the surface of these two municipalities into polygons of 600 meters. In this way, using the information of lightning activity (cloud-ground impacts) provided by the Colombian Network for Total Lightning Detection LINET between January 2016 and February 2020, the number of impacts per polygon was determined, which made it possible to identify the hotspots in the study areas. Likewise, elevated structures such as transmission towers, telecommunications antennas and buildings were identified and located and a radius of influence of 300 meters was established for each one of them taking into account the mean error of location of the LINET network. In this way it was possible to determine the twenty structures with the highest number of lightning strikes.

Results: The polygons with the highest lightning activity were found, of which 34 are located in Barrancabermeja and 235 in Yondó, which is consistent with maps of Density of Discharges to land made in the area where there is an increase in the number of flashes per square kilometer per year in Yondó compared to Barrancabermeja. 616 elevated structures were located in the municipalities of Barrancabermeja and Yondó, of which the twenty with the highest number of lightning strikes were chosen, which correspond 50% to transmission

towers, the structure with the highest number of impacts being a transmission tower of 70 meters high located on the border of the two study municipalities with a total of 68 impacts.

Conclusions: Of the 27 elevated structures found in Yondó, only 6 are located in a hotspot, which shows that in this municipality the presence of an elevated structure does not guarantee a hotspot and that the sites with the highest lightning activity are not influenced by the presence of elevated structures. Now, in the case of Barrancabermeja, 10 elevated structures were found in one of the hotspots, of which 7 are located in the urban area where 9 hotspots were found, from which it is inferred that in this municipality the urban planning and the presence of elevated structures, indeed increases the lightning activity.

Financing: Universidad Industrial de Santander.

Keywords: lightning, ground flash density (GFD), ceramic level, elevated structures, hotspots, LINET network.

(T2) Introducción

Estudios demuestran que de los 500 *hotspots* o lugares de mayor actividad de rayos en el globo terrestre, 283 de ellos se ubican en África, 87 en Asia, 67 en Suramérica, 53 en Norteaérica y 10 en Oceanía. Sin embargo, el sitio con mayor tasa de densidad de rayos (FRD) se encuentra sobre el lago de Maracaibo, al norte de Venezuela, en donde se registran en total 233 descargas/km²/año (Albrecht *et al.*, 2016), seguido por el *hotspot* hallado en la cuenca del Congo con un total de 205 descargas/km²/año (Christian *et al.*, 2003). Siete de los 10 sitios de mayor actividad de rayos en Suramérica se encuentran en Colombia, ya que su territorio se ubica en la zona de convergencia intertropical, donde confluyen los

vientos alisios del sureste y del noreste, para los cuales las tres cordilleras que atraviesan la superficie del país sirven como barrera natural (Albrecht *et al.*, 2016), lo que favorece la formación de tormentas eléctricas a altitudes entre 500 y 1500 m s. n. m., en donde se presentan los valores máximos de densidad de descargas a Tierra **DDT** (Aranguren *et al.*, 2017).

De esta manera, en la totalidad del territorio nacional se presentan alrededor de 8 millones de descargas atmosféricas nube-tierra al año (Torres, 1991). A pesar de que la densidad de descargas a Tierra varía de un año a otro, los lugares con alta actividad de rayos en Colombia se ubican siempre en regiones como el valle central del río Magdalena, el Catatumbo y el valle del río Cauca, en donde se registraron entre 1999 y 2013 valores máximos promedio de 34,6 descargas/km²/año (Herrera *et al.*, 2018).

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales de mayor impacto en la sociedad en general, dado que hacen vulnerables a sistemas de soporte y asistencia vital y edificaciones con gran afluencia de personas o que contengan equipos frágiles (Ibáñez *et al.*, 2005); ocasionan salidas de líneas de distribución y transmisión (Avendaño e Ibáñez, 2000); causan daños en sistemas eléctricos y generadores eólicos (Avendaño *et al.*, 2003), y problemas de compatibilidad electromagnética en los sistemas de comunicaciones y afectación directa a sistemas de aviación (Rakov y Uman, 2003). Con lo que se producen pérdidas económicas y de vidas humanas y se afectan los indicadores de calidad de energía eléctrica como el SAIDI y el SAIFI. Por ello, el entendimiento de este fenómeno natural y su caracterización son de suma importancia para poder diseñar sistemas de protección más

robustos, y elaborar planes encaminados a proteger vidas humanas y a mitigar daños materiales y pérdidas económicas (Del Río Trujillo, 2018).

Las estructuras elevadas tienen más probabilidad de ser impactadas por rayos que sus alrededores (Rachidi *et al.*, 2008), dado que responden con líderes ascendentes de captura a los líderes escalonados que descienden de la atmósfera (Rakov y Uman, 2003). Así mismo, mientras que en las tormentas de invierno en latitudes medias se observa claramente cómo las estructuras elevadas inician líderes ascendentes, formando puntos de muy alta actividad de rayos (Montanyà *et al.*, 2014; Mostajabi *et al.*, 2018; Candela Garolera *et al.*, 2015), las regiones tropicales como Colombia presentan DDT muy elevadas, por lo que es difícil que la actividad en un punto concreto, o sobre alguna estructura, pueda sobrepasar la media de la región y por tanto no resulta evidente la identificación de *hotspots* y tampoco la influencia de estructuras elevadas allí ubicadas en la cantidad de impactos de rayo. Hasta el momento, los sitios de alta actividad de rayos se han determinado con base en la ocurrencia espacial de descargas nube-tierra a través del parámetro de la DDT. La metodología planteada se basa en la ocurrencia temporal de descargas nube-tierra (CG, por su sigla en inglés); es decir, para que una región sea un *hotspot*, se debe repetir el número de rayos y conservarse en el tiempo, o lo que es igual, se debe presentar de manera recurrente.

En este trabajo se determinan los lugares y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, a partir de información proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos, con tecnología LINET y se estudia la influencia de estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones en la actividad de rayos en esta región. Luego, presenta la metodología usada para la determinación de *hotspots* y estructuras, los cuales se agrupan

en la sección de resultados. Por último, a modo de conclusiones, se da el número de sitios de mayor actividad de rayos por municipio y la presencia de estructuras elevadas en cada uno de ellos. Se espera que los sitios en donde se ubica alguna estructura elevada correspondan a un *hotspot* o que, en general, tengan un número significativo de impactos de rayo.

(T2) Metodología

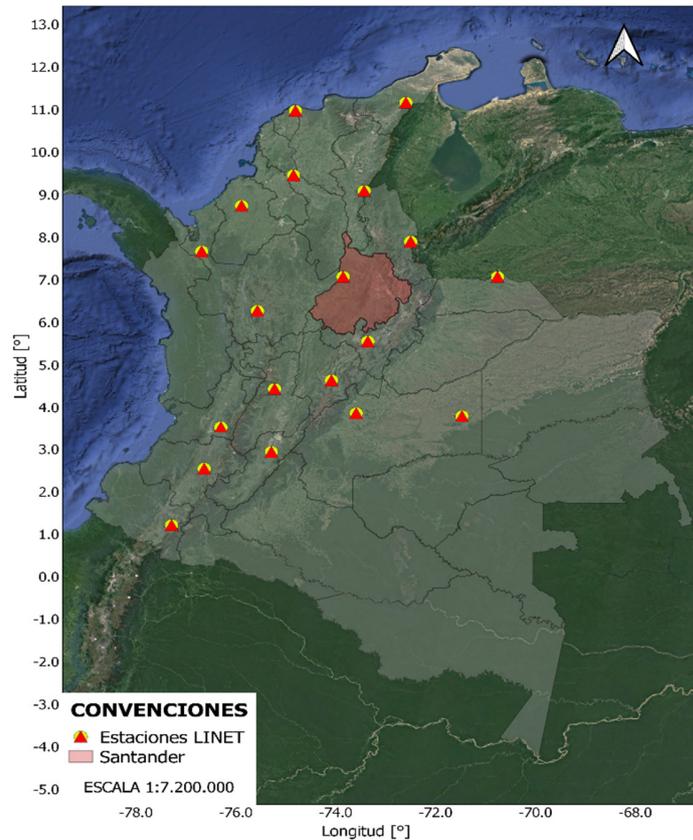
(T3) Base de datos: Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología

LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos (LINET), propiedad de Keraunos S. A. S. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema *Total Lightning* que entrega parámetros para cada *stroke* como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga y altura de emisión, usando técnicas de tiempo de arribo (TOA, por su sigla en inglés) (Aranguren *et al.*, 2013). Para la obtención de estos datos, se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional, como se muestra en la figura 1, donde la separación entre sensores varía entre 90 km y 140 km (Aranguren *et al.*, 2017).

Con esta distribución se logra una eficiencia en la detección de descargas nube-tierra del 99 % en zonas centrales del país; del 95 %, para regiones más alejadas como el Pacífico, la Caribe, la Orinoquía occidental y el bajo Cauca; del 90 %-80 %, para la Orinoquía oriental y el suroeste del país, y del 60 %, para la Amazonía. Para descargas intranube, estos valores de eficiencia disminuyen considerablemente y varían entre el 80 % y el 20 %.

Figura 1. Ubicación geográfica de estructuras elevadas



Fuente: Elaboración propia

Cuando ocurre una descarga eléctrica, cada estación registra la forma de onda del campo magnético y su estampa de tiempo. Los datos de la detección son enviados en tiempo real por cada estación a una Unidad de Procesamiento Central, en la cual se ejecuta el algoritmo de detección de rayos que realiza la identificación y determinación de los parámetros de la descarga. Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal (Aranguren *et al.*, 2013).

(T3) Procesamiento de datos de la Red LINET

La Red LINET cataloga las descargas nube-tierra como tipo 1, y las intranube como tipo 2. En este estudio solo se tuvieron en cuenta las descargas tipo 1 (*strokes*), lo que permite encontrar los sitios y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo. Teniendo en cuenta que hay zonas en el país en donde la amplitud mínima detectable de la corriente pico de descarga es de 10 kA (Aranguren *et al.*, 2013; Williams, 2001), no se consideraron los impactos con corrientes menores a este valor. Los datos procesados de la Red LINET se encuentran desde enero de 2016 hasta febrero de 2020.

(T3) Estructuras elevadas, clasificación y radio de influencia

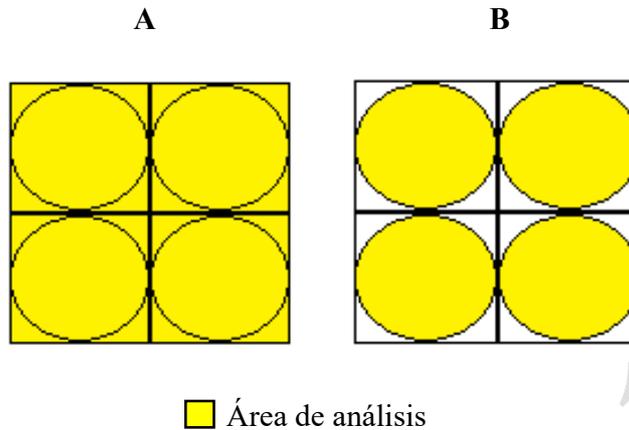
Mediante *Google Earth* y *Google Street View* se encontraron las coordenadas geográficas de un total de 616 estructuras elevadas ubicadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó. La totalidad de estructuras halladas se dividió en cuatro grupos: torres de transmisión de más de 20 m, antenas de telecomunicaciones de más de 30 m, edificios de más de 10 pisos de altura y otras estructuras como tanques elevados y reflectores de estadio. Para cada estructura se establece un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización la Red LINET; entonces, si una descarga CG se ubica dentro de dicho radio, se considera que impactó la estructura. La totalidad de estructuras halladas se encuentran dentro de la zona de alta eficiencia en la detección de la red Lightning Mapping Array (LMA), instalada en Barrancabermeja en 2018 y que detecta fuentes de radio en VHF emitidas por líderes de rayo en sus procesos de ionización. De esta manera, es posible reconstruir la propagación espacial y temporal de descargas atmosféricas (Rison *et al.*, 1999) y establecer su interacción con alguna estructura elevada. La red está compuesta por 6 estaciones, 4 de

ellas ubicadas en campos petroleros de Ecopetrol, como Lisama, La Cira, Llanito y Casabe, y 2 en universidades como la Unipaz y la sede UIS Barrancabermeja, desde donde se establece la zona de alta eficiencia que corresponde a un radio de 45 km; en esta se pueden mapear las fuentes emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayo y por tanto se minimiza el error en la localización de estas.

(T3) Localización de impactos y recuadros de 600 m de lado en los municipios a analizar

Para la caracterización de las zonas con mayor incidencia de rayos nube-tierra se ubicó cada *stroke* registrado por la Red LINET como un punto en el espacio, y se creó una cuadrícula de 600 m de lado sobre la superficie de los municipios de interés donde cada recuadro se aproxima a circunferencias con radio de 300 m que corresponde a la exactitud promedio de la Red LINET en la zona de estudio. Se evita el uso de circunferencias, ya que al ubicar círculos tangentes entre sí quedarían zonas por fuera de ellos, las cuales no se analizarían; en cambio, se traza una cuadrícula donde se circunscribe cada círculo y también se analiza la zona que queda por fuera de este. La figura 2 ilustra la metodología utilizada.

Figura 2. Área de análisis usando a) recuadros de 600 m de lado; b) círculos tangentes de 300 m de radio



Fuente: Elaboración propia

Además, la cuadrícula da resultados más exactos, dado que el área del recuadro es menor que la que se ha usado en la determinación de la DDT, lo que muestra con menor incertidumbre la influencia de la topografía del terreno en la actividad de rayos

(T3) Determinación del total de impactos por cuadrícula y por estructura

Mediante la herramienta análisis de puntos del programa *QGIS*, que permite cuantificar la cantidad de puntos dentro de cada polígono rectangular, se determina el número de impactos por cuadrícula, de esta manera se localizan mediante un centroide las zonas de mayor cantidad de impactos de rayo o *hotspots*.

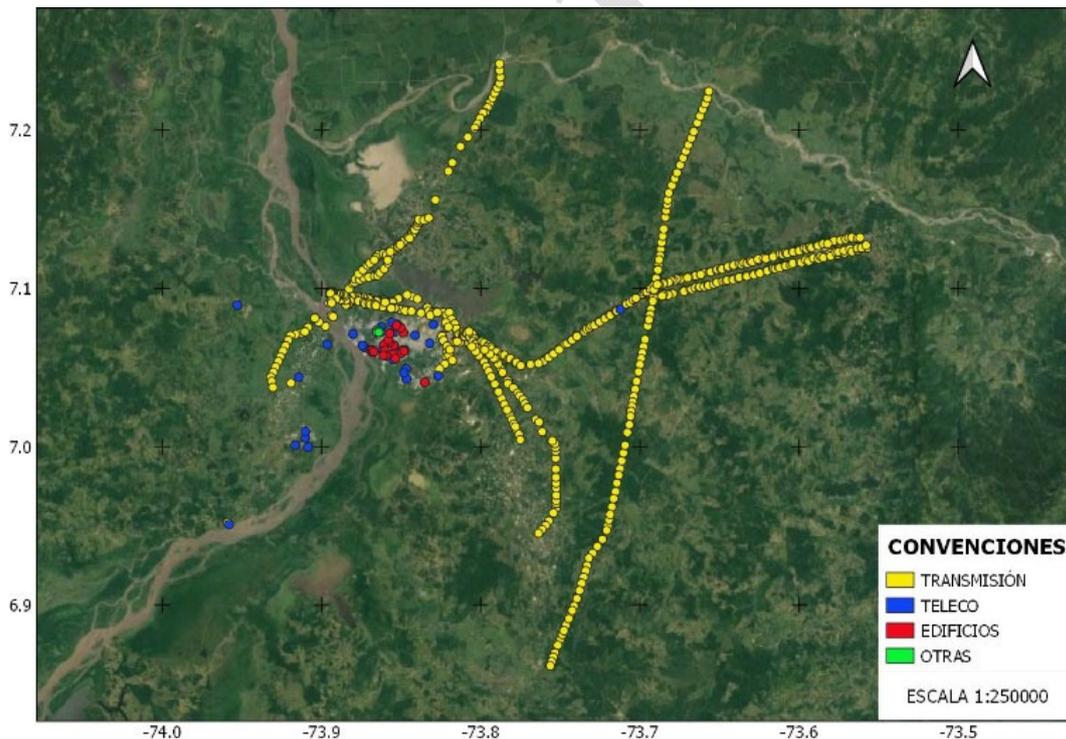
En cuanto al análisis de estructuras elevadas, la información de la Red LINET se procesó diariamente para así determinar los días en que hubo una mayor interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Para cada día se determinaron y cuantificaron las descargas que estuvieron dentro del radio de influencia de cada estructura y, finalmente, se escogieron las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos.

(T2) Resultados

(T3) Estructuras elevadas

La figura 3 muestra la ubicación de las 616 estructuras elevadas encontradas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, entre las que se encuentran 549 torres de transmisión con alturas entre 40 m y 70 m, 31 torres de telecomunicaciones con alturas que varían entre 60 m y 70 m, 22 edificaciones de más de 30 m y 4 estructuras de iluminación de estadios de 50 m.

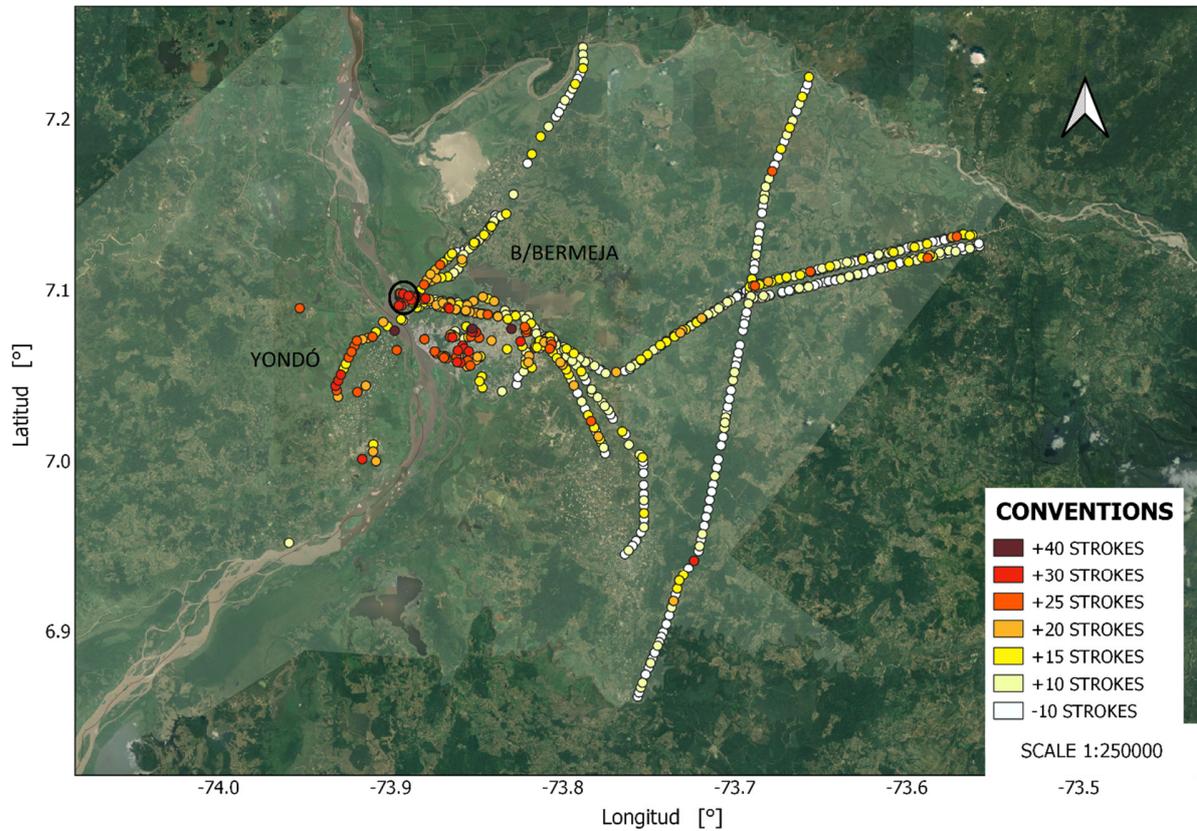
Figura 3. Ubicación geográfica de estructuras elevadas



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las torres de transmisión forman parte del Sistema de Transmisión Nacional (STN) y corresponden a líneas de extra alta tensión como Barranca-Comuneros 230 kV, Comuneros-La Cira 230 kV, Comuneros-Merilétrica 230 kV y de alta tensión como Barranca Lizama 115 kV, Barranca-San Silvestre 115 kV, San Silvestre-Lizama 115 kV y Barranca-Puerto Wilches 115 kV. Así mismo, las antenas de telecomunicaciones se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja y en el costado oriental de Yondó. La figura 4 ilustra la caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo en el periodo de tiempo de estudio.

Figura 4. Caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo recibidas



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura 4, las estructuras que se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja, como edificaciones y antenas de telecomunicaciones, y la mayoría de las de Yondó, presentan una alta interacción con descargas atmosféricas, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en Yondó al finalizar el puente que cruza el río Magdalena. Se observa un aumento en la actividad de rayos en límites de los dos municipios en mención, especialmente en las torres de transmisión de 230 kV ubicadas cerca de la central termoeléctrica Termobarranca (dentro de la

circunferencia negra) y en las estructuras de las líneas de extra alta tensión que salen de esta subestación como la línea Barranca-Comuneros 230 kV.

Así mismo, algunas estructuras de las líneas que llegan a la subestación Lizama 115 kV provenientes de Barranca 115 kV y San Silvestre 115 kV presentan una importante interacción con descargas atmosféricas, como se observa en los puntos de coloración oscura a la derecha de la figura anterior. La figura 5 ilustra las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo.

Figura 5. Estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo



Fuente: Elaboración propia

Estas estructuras, sus características, ubicación e impactos de rayo se muestran en la tabla 1, donde aparecen torres de transmisión (TRANS), antenas de telecomunicaciones (TELECO), edificaciones (EDIF), tanques elevados (TANQUE) y reflectores de estadio (REFL).

Tabla 1

Estructuras con mayor número de impactos en Barrancabermeja-Yondó

Torre	Lat.	Long.	Tipo	Altura [m]	Impact
1	7,076	-73,898	TRANS	70	46
583	7,077	-73,830	TANQUE	50	41
585	7,077	-73,852	TELECO	50	41
184	7,044	-73,932	TRANS	60	39
609	7,077	-73,853	EDIF	50	39
182	7,051	-73,929	TRANS	60	37
23	7,070	-73,824	TRANS	60	36
587	7,076	-73,852	TELECO	50	36
209	7,076	-73,851	EDIF	40	35
598	7,058	-73,861	EDIF	40	35
106	7,091	-73,894	TRANS	70	34
183	7,047	-73,930	TRANS	60	34
605	7,068	-73,858	EDIF	40	34
607	7,076	-73,853	EDIF	40	34
64	7,10	-73,880	TRANS	60	33
75	7,089	-73,866	TRANS	60	33
91	7,097	-73,890	TRANS	60	33
105	7,092	-73,894	TRANS	70	33
198	7,06	-73,855	EDIF	40	33
616	7,072	-73,864	REFL	40	33

Fuente: Elaboración propia

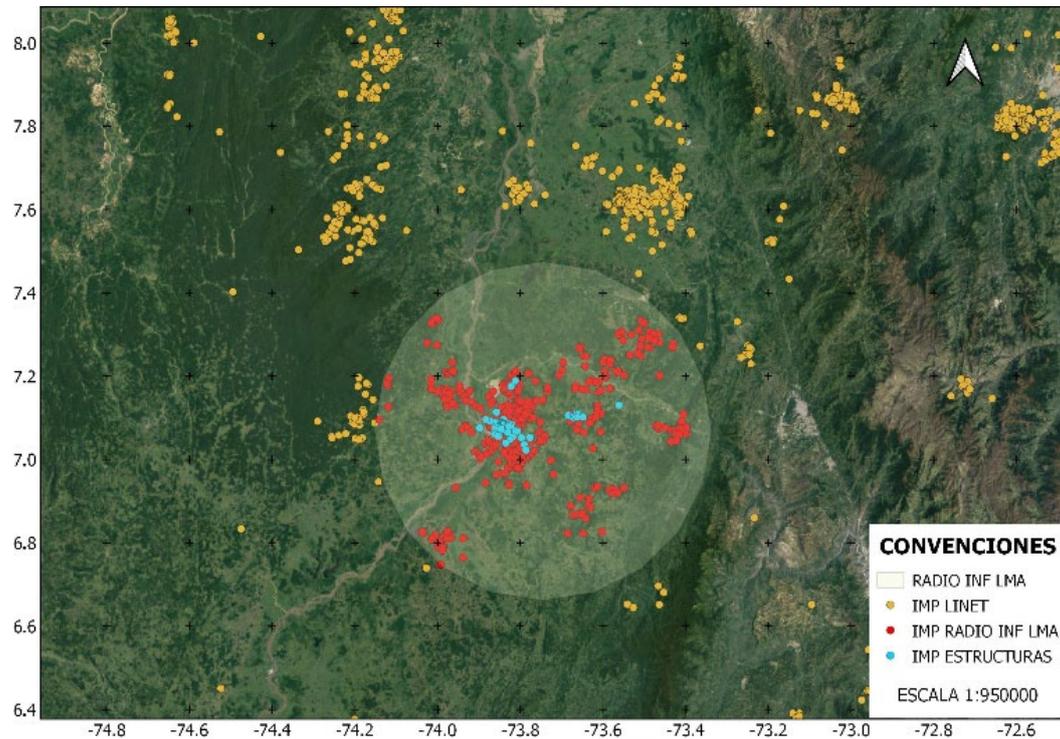
El 50 % de estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo corresponden a torres de transmisión debido a que son las que presentan alturas mayores, las cuales varían entre 60 m y 70 m. La segunda estructura en la lista corresponde a un tanque elevado ubicado en

el casco urbano de Barrancabermeja. Así mismo, aparecen dos antenas de telecomunicaciones de 50 m y seis edificaciones con alturas promedio de 40 m. Las estructuras 182, 183 y 184 corresponden a una línea de transmisión de 115 kV en Yondó en donde, según estudios como Aranguren *et al.* (2017), se registra un aumento de la DDT.

Partiendo de la información de descargas nube-tierra suministrada por la Red LINET, se realizó un análisis diario para cada estructura entre noviembre de 2018 y noviembre de 2019.

La figura 6 muestra la actividad de rayos el 23 de noviembre de 2018. Los puntos amarillos corresponden a descargas nube-tierra detectadas por la Red LINET, de los cuales los puntos rojos corresponden a descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA, y por último, los puntos azules corresponden a descargas directas sobre alguna estructura elevada. Para este día en particular hubo 233 impactos (*strokes*) sobre estructuras elevadas, que alcanzaron una corriente máxima de -119,7 kA, de esta manera se pueden determinar las fechas de mayor interacción de impactos de rayo y estudiar su propagación a través de las fuentes mapeadas por la Red LMA en estudios posteriores.

Figura 6. Impactos de rayo en estructuras elevadas el 23 de noviembre de 18



Fuente: Elaboración propia

Con base en lo anterior, en la tabla 2 se determinan los impactos de rayo en estructuras y la cantidad de impactos dentro del radio de influencia de la Red LMA por mes.

Tabla 2 : Impactos de rayo en estructuras y dentro del radio de influencia de la Red LMA entre noviembre de 2018 y 2019.

Mes	Imp. estruct.	Imp. inf. LMA
Nov. 18	748	14587
Dic. 18	3	374
Ene. 19	3	755
Feb. 19	37	5221
Mar. 19	195	5794
Abr. 19	162	10600
May. 19	787	14567
Jun. 19	393	10420
Jul. 19	283	7549

Ago. 19	243	11955
Sep. 19	487	13482
Oct. 19	488	12640
Nov. 19	685	14994

Fuente: Elaboración propia

En mayo y noviembre se presenta una alta interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Septiembre y octubre tienen una interacción media alta; junio, julio y agosto, un nivel medio; marzo y abril, un nivel medio-bajo, y diciembre, enero y febrero una baja interacción de rayos con estructuras elevadas. Este mismo comportamiento se presenta con las descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA.

Haciendo un estudio más detallado, la tabla 3 muestra los días con mayor cantidad de impactos de rayo sobre estructuras elevadas.

Tabla 3

Días de mayor cantidad de impactos en estructuras elevadas

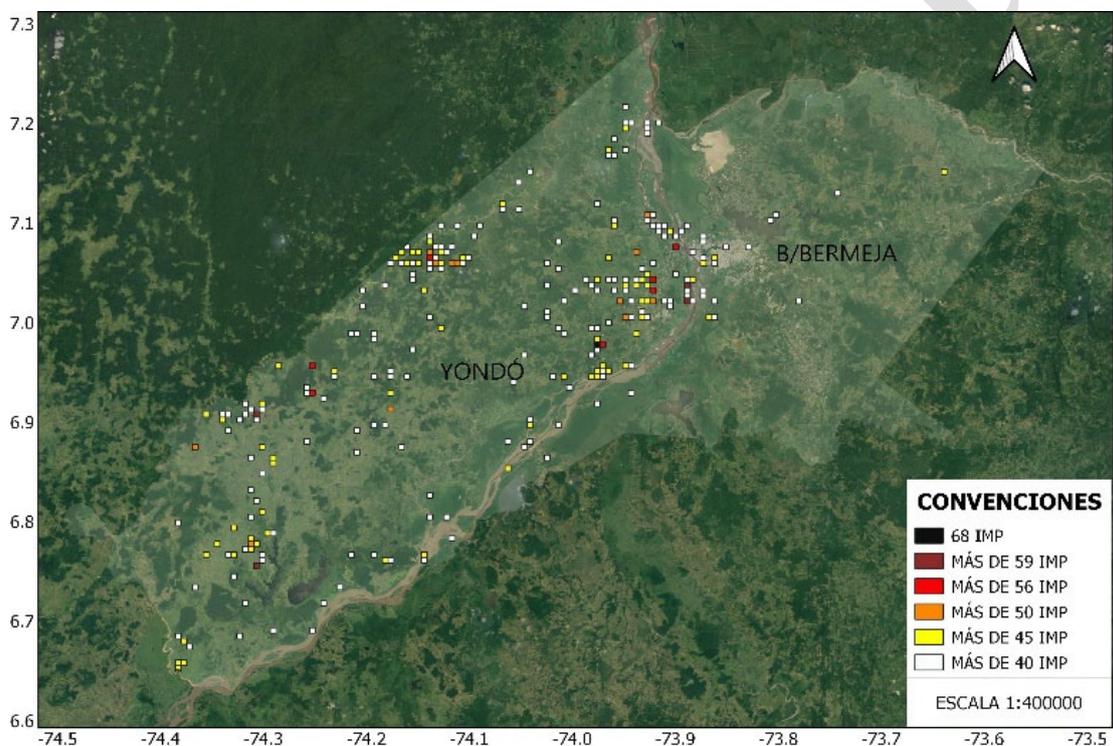
Día	Imp. estruct.
24/may./19	587
23/nov./18	233
13/nov./18	196
11/nov./19	193
16/sep./19	183
24/jun./19	168
02/oct./19	150
13/jul./19	145
04/nov./19	130
22/nov./18	117

Fuente: Elaboración propia

(T3) Hotspots

Los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo se muestran en la figura 7, en donde las tonalidades oscuras indican una mayor actividad de rayos.

Figura 7. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el periodo de estudio estipulado en la metodología, se encontraron 269 sitios con más de 40 impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, siendo una zona boscosa ubicada al oriente de este último (con coordenadas geográficas 6.978, -73.976) el sitio con mayor cantidad de impactos con un total de 68.

De la totalidad de *hotspots*, 34 se ubican en el municipio de Barrancabermeja y 235 en Yondó, esto último coincide con mapas de DDT realizados en la zona en donde se evidencia una alta actividad de rayos en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Los recuadros en tonalidades oscuras que se muestran en la figura 5 (de 56 a 68 descargas) coinciden con los sitios de mayor cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año, o DDT, los cuales tienen entre 40,4 y 53,9 descargas/km²/año.

Para el caso de Yondó, la mayoría de sitios de alta actividad de rayos en la región occidental corresponden a zonas boscosas, y algunos de ellos se ubican cerca de la ribera del río Magdalena. En la región central se observa una zona de alta densidad de *hotspots* comprendida entre latitudes de 7.0 y 7.1 grados, y longitudes de -74.1 y -74.2 grados. En el costado oriental, los sitios de mayor actividad hallados se distribuyen ampliamente, algunos de ellos se hallan en campos petroleros cercanos al casco urbano de Yondó. Esta zona es la que presenta la mayor actividad de rayos ya que se encontraron al menos 7 sitios en donde hubo entre 59 y 68 impactos.

Para el caso de Barrancabermeja, se encontraron 9 *hotspots* en el casco urbano del municipio; otros 2, cercanos a la ciénaga de San Silvestre; 2, en la central de generación térmica Barranca, y los restantes, en zonas boscosas o en cercanas a la ribera del río Magdalena, como se observa en los costados norte y sur del municipio. De la totalidad de *hotspots* hallados, solo 4 de ellos presentan más de 45 impactos y en los sitios remanentes se registran al menos 40 impactos. La tabla 4 muestra los 20 sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de estudio.

Tabla 4

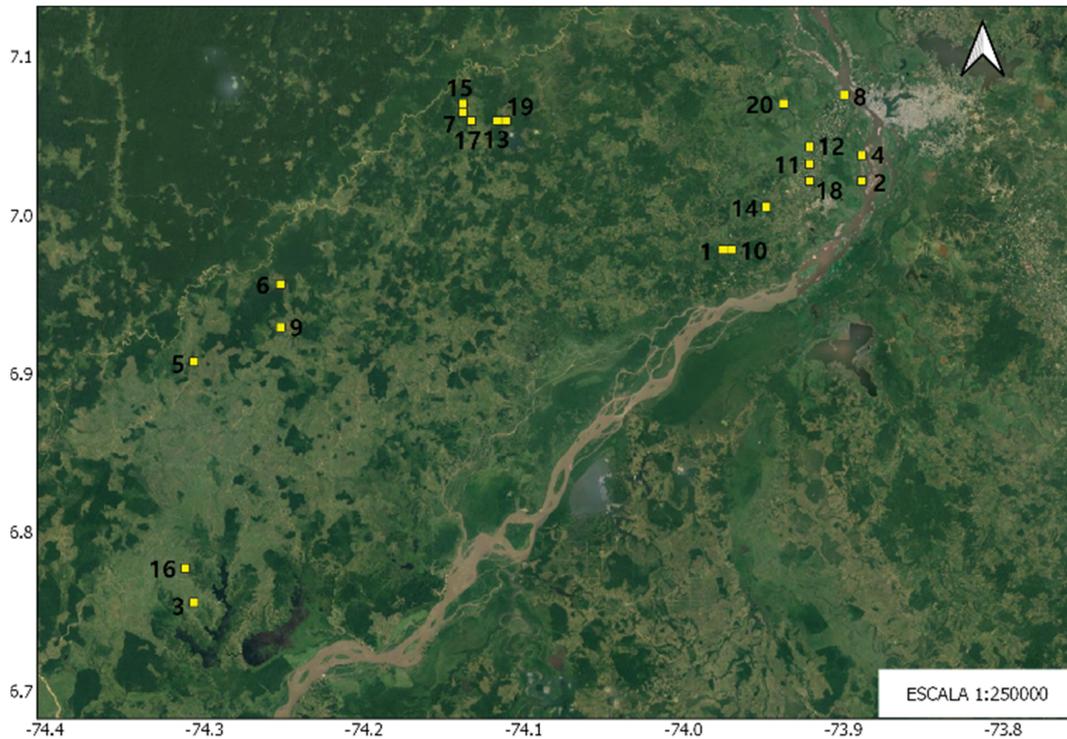
Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo

Hotspot	Impactos	Latitud	Longitud
1	68	6,978	-73,976
2	62	7,022	-73,889
3	60	6,756	-74,307
4	59	6,908	-74,307
5	59	7,038	-73,889
6	58	6,929	-74,252
7	58	7,076	-73,899
8	58	6,956	-74,252
9	58	7,065	-74,138
10	56	6,978	-73,970
11	56	7,032	-73,921
12	56	7,043	-73,921
13	55	7,005	-73,948
14	55	7,060	-74,117
15	54	6,777	-74,312
16	54	7,070	-74,138
17	53	7,060	-74,133
18	53	7,022	-73,921
19	53	7,060	-74,111
20	52	6,875	-74,366

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior se muestra en la figura 8 donde se evidencia que la totalidad de estos sitios se ubican en el municipio de Yondó, lo que es coincidente con mapas de DDT como el mostrado en Aranguren *et al.* (2017), donde se evidencia una amplia zona de mayor actividad de rayos en este municipio, en comparación con Barrancabermeja.

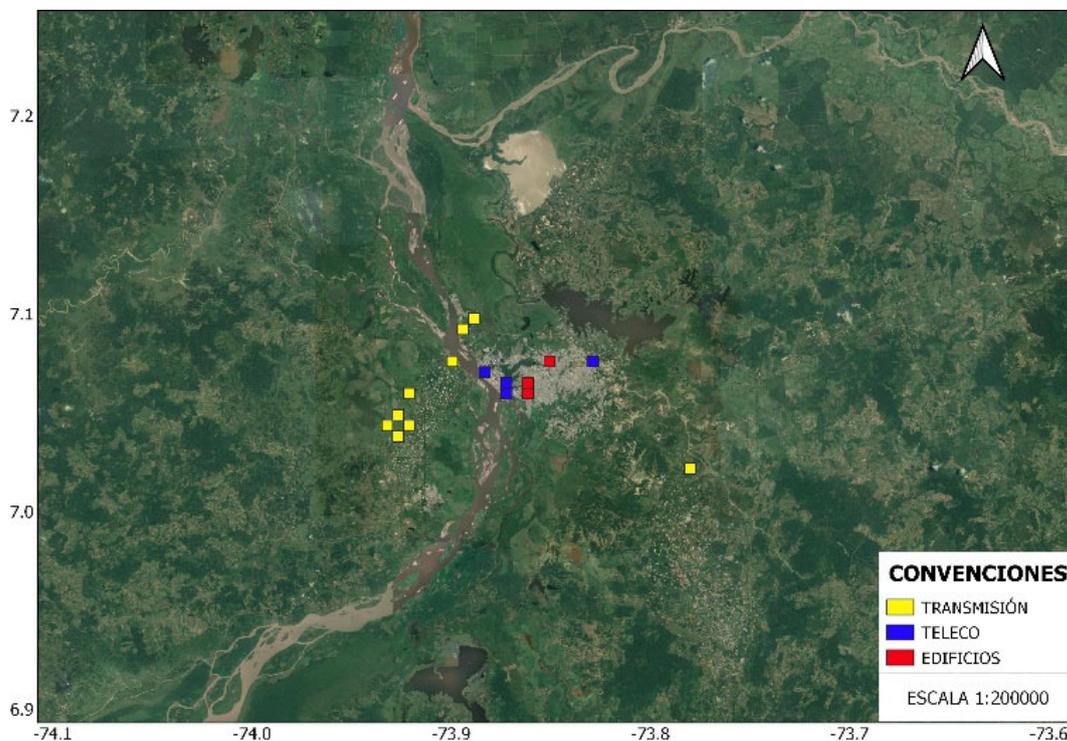
Figura 8. Primeros *hotspots* en Barrancabermeja y Yondó



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, de la totalidad de *hotspots* hallados se determinó en cuántos de ellos se ubicó alguna estructura elevada, de las que se muestran en la figura 2, con el fin de estudiar su influencia en la cantidad de impactos de rayo en determinada región. En la figura 9 se evidencia lo expuesto anteriormente, se observan nueve torres de transmisión presentes en algún *hotspot*, las cuales, debido al elevado número de impactos, registran la más alta probabilidad de flameos inversos hacia los conductores de fase, lo que ocasiona salidas de las líneas. Así mismo se observa una importante influencia del urbanismo en la determinación de los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo, esto se demuestra dado que en el casco urbano de Barrancabermeja se ubican 7 *hotspots*, de los cuales en 4 se localizan antenas de telecomunicaciones y en tres edificaciones.

Figura 9. Estructuras elevadas presentes en los sitios de mayor cantidad de impactos de rayo



Fuente: Elaboración propia

(T2) Conclusiones

Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, de las cuales se escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50 % a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio, con un total de 68 impactos. Estructuras elevadas presentes en el casco urbano de Barrancabermeja y la totalidad de las halladas en Yondó registran una importante interacción

con descargas atmosféricas, así como las torres de transmisión cercanas a la central de generación térmica Termobarranca.

Se encontraron los sitios con mayor actividad de rayos, de los cuales, 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de densidad de descargas a Tierra (DDT) hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja.

De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja, se hallaron 10 estructuras elevadas en algún *hotspot*, de las cuales 7 se ubican en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que en este municipio el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas sí aumenta la actividad de rayos.

(T2) Financiamiento

Universidad Industrial de Santander.

(T2) Referencias

Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J. y Christian, H. J. (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, D., López, J., Inampué, J., Torres, H. y 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>
- Avendaño, C. A. y Ibáñez Olaya, H. F. (2000). Sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos. *Tecnura*, 4(7), 43-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.6105>
- Avendaño, C. A., Ibáñez Olaya, H. F. y Ortiz Sánchez, H. E. (2003). Evaluación del riesgo de daño en sistemas eléctricos de baja tensión a causa de los rayos, bajo la metodología IEC. *Tecnura*, 6(12), 42-51. <https://doi.org/10.14483/22487638.6139>
- Candela Garolera, A., Cummins, K. L., Madsen, S. F., Holboell, J. y Myers, J. D. (2015). Multiple lightning discharges in wind turbines associated with nearby cloud-to-ground lightning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(2), 526-533. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2391013>
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M., Koshak, W. J., Mach, D. M. y Stewart, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(D1), ACL 4-1-ACL 4-15. <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>

Del Río Trujillo, D. F. (2018). *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63293>

Herrera, J., Younes, C. y 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>

Ibáñez Olaya, H. F., Ortiz Suárez, H. E. y Avendaño Avendaño, C. A. (2005). Correlación entre la actividad ceráunea y la localización de daño en equipos eléctricos y electrónicos a causa de rayos en Bogotá, Colombia. *Tecnura*, 8(16), 86-93. <https://doi.org/10.14483/22487638.6235>

Montanyà, J., Van der Velde, O. y Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines. *Journal of Geophysical Research*, 119(3), 1455-1462. <https://doi.org/10.1002/2013JD020225>

Mostajabi, A., Pineda, N., Romero, D., Azadifar, M., Van der Velde, O., Montanyá, J., Rubinstein, M. y Rachidi, F. (2018). LMA observation of upward flashes at Säntis Tower: Preliminary results. En *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on*

Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018 (pp. 399-402).

<https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393808>

Rachidi, F., Rubinstein, M. Montanyà, J., Bermúdez, J. L., Rodríguez Sola, R., Solà, G. y Korovkin, N. (2008). A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2489-2496. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896443>

Rakov, V. A. y Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and effects*. Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107340886>

Rison, W., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Hamlin, T. y Harlin, J. (1999). A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in Central New Mexico. *Geophysical Research Letters*, 26(23), 3573-3576. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856>

Williams, E. (2001). *Severe convective storms*. American Meteorological Society.

Torres, H. (2002). *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Unilibros.