

Identificación y análisis de los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de
Santander

Kevin Alberto Velandia López

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
Edison Andrés Soto Ríos
PhD. en Ingeniería

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga

Agradecimientos

A DIOS por su guía durante mi vida universitaria.

A la empresa Keraunos la cual me permitió trabajar con la base de datos de strokes de la Red LINET que fue fundamental para el desarrollo de este trabajo de grado.

Al profesor Edison Andrés Soto Ríos director de este trabajo de grado por sus conocimientos, orientación, colaboración y paciencia a lo largo de esta investigación.

A mi familia que es mi motor para siempre seguir adelante y luchando por mis metas.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1.Descripción del proyecto	14
1.1.Objetivo general.....	14
1.2.Objetivo específicos.....	14
1.3.Alcance	14
1.4.Justificación	15
1.5.Planteamiento del problema.....	15
1.6.Metodología	16
2.Antecedentes	18
3.Parámetros del rayo.....	20
3.1.Nivel Cerámico (NC).....	20
3.2.Densidad de Descargas a Tierra (DDT).....	22
3.3.Multiplicidad (M).....	24
4.Sistemas de localización y detección de Rayos	25
4.1.Redes de localización en Colombia	25
4.2.Red Colombiana de Detección Total de Rayos – LINET.....	28
4.2.1.Datos suministrados.	31
4.2.2.Eficiencia de la red.....	31
5.Software QGIS.....	35
6.Actividad de rayos en Santander.....	38
6.1.Densidad de descargas por área	39
6.2.Densidad de Descargas a Tierra en Santander (DDT)	46
7.Antena de captación.....	56
8.Conclusiones	64

Referencias Bibliográficas66

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de actividad de rayos ofrecido por la NASA, desde el año 1998 al 2012 en la zona intertropical.	12
Figura 2. Muertes por rayos durante 18 años en Colombia.	19
Figura 3. Mapa de nivel cerámico de Colombia.	21
Figura 4. Densidad de descargas a tierra (Rayos/km ² año) medida en Colombia y parte de Venezuela en 2012.	23
Figura 5. Tiempos para establecer los strokes en una misma descarga.	24
Figura 6. Red Colombiana de medición y localización RECMA.	26
Figura 7. Red de localización de rayos – LINET año 2015.	29
Figura 8. Antena de campo magnético (a) Unidad de procesamiento local (b).	30
Figura 9. Amplitud de la corriente de rayo mínima detectable, dada en kA.	33
Figura 10. Capacidad de detección de la red LINET.	34
Figura 11. Interfaz software QGIS.	36
Figura 12. Selección de datos por localización en QGIS.	37
Figura 13. División política de Santander.	38
Figura 14. Crecimiento en la incidencia de rayos.	43
Figura 15. Tablas cantidad de rayos por horas en 2014, 2015, 2016 y 2017.	44
Figura 16. Cantidad de rayos por meses en 2014, 2015, 2016 y 2017.	45
Figura 17. Densidad de descargas a tierra Santander 2014.	47
Figura 18. Ubicaciones con la mayor DDT 2014 Suaita y Charalá.	48
Figura 19. Densidad de descargas a tierra Santander 2015.	49

Figura 20. Ubicaciones con la mayor DDT 2015; Cimitarra (a) Bolívar (b) Suaita y Charalá (c) Vélez (d).....	50
Figura 21. Densidad de descargas a tierra Santander 2016	51
Figura 22. Ubicaciones con la mayor DDT 2015; Suaita y Charalá (a) Bolívar (b).....	52
Figura 23. Densidad de descargas a tierra Santander 2017	53
Figura 24. Ubicaciones con la mayor DDT 2017; Bolívar (a) Suaita y Charalá (b).....	54
Figura 25. Mapa de la densidad de descargas a tierra de los 4 años de estudio.	55
Figura 26. Recorte zona en estudio sugerida	57
Figura 27. Mapa de la densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2014.....	58
Figura 28. Mapa de la densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2015.....	59
Figura 29. Mapa de la densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2016.....	60
Figura 30. Mapa de la densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2017.....	61
Figura 31. Mapa de la densidad de descargas promedio de la zona sugerida.....	62
Figura 32. Mapa DDT promedio de la zona sugerida.....	63

Lista de Tablas

Tabla 1. Tablas de Densidad alta de Strokes por área en municipios. Años 2014-2015-2016-2017.....	39
Tabla 2. Tablas de Densidad baja de Strokes por área en municipios. Años 2014-2015-2016-2017.....	40
Tabla 3. Tablas de Densidad de Strokes por área en provincias. Años 2014-2015-2016-2017. ..	41
Tabla 4. Tablas de Densidad de Strokes por área en Santander. Años 2014-2015-2016-2017....	41
Tabla 5. Cantidad de rayos por horas en 2014, 2015, 2016 y 2017.....	43

RESUMEN

TÍTULO: IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS SITIOS CON MAYOR ACTIVIDAD DE RAYOS EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER*

AUTOR: KEVIN ALBERTO VELANDIA LÓPEZ**

PALABRAS CLAVE: RAYOS, SANTANDER, ACTIVIDAD DE RAYOS, DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA [DDT], NIVEL CERÁUNICO [NC], INCIDENCIA DE RAYOS.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado se fundamenta en el estudio de la actividad de las descargas atmosféricas en el departamento de Santander, realizando un avance en el estudio del rayo en la zona intertropical, hallando los parámetros y el comportamiento específico en pequeñas ubicaciones. Usando la información de la actividad de rayos proporcionada por la red LINET (Red Colombiana de Detección Total de Rayos) de los años 2014, 2015, 2016 y 2017, se cuantificará la incidencia de rayos en los municipios, las provincias y el departamento de Santander, determinando la actividad de descargas dependiendo de cada área, por otra parte se construirán los primeros mapas de la densidad de descargas a tierra o DDT en Santander (la cantidad de rayos que ocurren anualmente en un área de 1km²), donde se pueden identificar con más exactitud los sitios de mayor incidencia de rayos en cada uno de los años en estudio. Con la información adquirida en este proyecto de grado, se desea indicar las zonas más favorables para la ubicación de una antena de captación y medición de parámetros de rayo, para poder seguir progresando en la investigación acerca de este fenómeno natural y analizar los parámetros propios del rayo en el territorio santandereano.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director PhD EDISON ANDRES SOTO RIOS.

ABSTRACT

TITLE: IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF THE SITES WITH THE HIGHEST LIGHTNING ACTIVITY IN THE DEPARTMENT OF SANTANDER*.

AUTHOR: KEVIN ALBERTO VELANDIA LOPEZ**.

KEYWORDS: LIGHTNING, SANTANDER, LIGHTNING ACTIVITY, ATMOSPHERIC DISCHARGES, GROUND FLASH DENSITY [GFD], KERAUNIC LEVEL [KL], LIGHTNING INCIDENCE.

DESCRIPTION:

The present work is based on the study of the activity of atmospheric discharges in the department of Santander, making progress in the study of lightning in the intertropical zone, establishing its characteristics and behavior which are specific to small locations. Using the lightning activity information provided by the LINET (Colombian Network for Total Lightning Detection) network for the years 2014, 2015, 2016 and 2017, the incidence of lightning in municipalities, provinces and the department will be quantified, determining the lightning activity depending on its own area, on the other hand, the first maps of the density of land discharges or GFD in Santander (the amount of lightning that occurs annually in an area of 1km²) will be constructed, where the sites with the highest incidence of lightning in each of the years under study can be identified more accurately. With the information acquired in this degree project, we wish to suggest the most favorable areas for the location of an antenna for capturing and measuring lightning parameters, in order to continue progressing in the investigation of this natural phenomenon and to analyze the specific parameters in the santanderean territory.

* Degree Paper.

** Faculty of Physics and Mechanical Engineering. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director E.I. PhD EDISON ANDRES SOTO RIOS.

Introducción

Al tener como objeto de estudio un fenómeno natural como lo es el rayo, se desea prevenir situaciones de desastre y realizar una protección adecuada a las vidas y a los bienes materiales, de ahí la importancia de la apropiación del tema, comprendiendo las características de este acontecimiento y planificando la mejor estrategia de control para no producir ninguna afectación.

Dada la posición geográfica de Colombia, esta se ubica en la zona intertropical terrestre, la cual se caracteriza por no tener estaciones marcadas como en las zonas templadas, en vez de eso cuenta con una climatología especial, la cual con el aporte de una de las zonas de mayor convección profunda del planeta como lo es Sudamérica tropical, hacen que se presente una de las actividades de rayo más representativas del planeta.

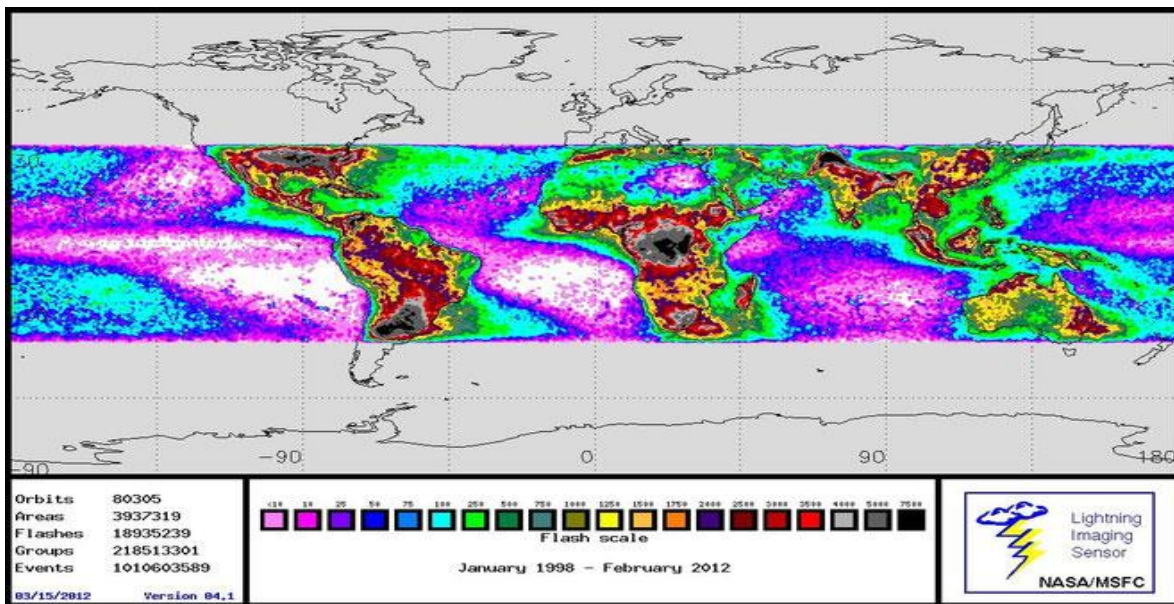


Figura 1. Mapa de actividad de rayos ofrecido por la NASA, desde el año 1998 al 2012 en la zona intertropical.

Fuente: (Ballesterismo, 2011)¹

¹ (Ballesterismo, 2011)

La energía eléctrica se ha vuelto indispensable en la vida del ser humano y las descargas atmosféricas son la principal causa de interrupción en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica alrededor del mundo, para los sistemas de transmisión las interrupciones no garantizan una óptima prestación del servicio de energía eléctrica, aparte de las pérdidas millonarias en equipos y la no comercialización de la energía; en Colombia, la actividad eléctrica ocasiono fallas en líneas de transmisión de 500 kV y 230 kV, en un 47% en el año de 1996 y un 69% en el año de 1997, de acuerdo con los datos de propiedad de ISA ².

De acuerdo con esto, el riesgo de ser impactado por una descarga atmosférica en Colombia es alto, especialmente en los departamentos de Antioquia, Cauca, Santander, Valle del Cauca, Bolívar, Magdalena, Boyacá y Córdoba, donde es más frecuente que se presenten estos incidentes ³. Al día de hoy, la mayoría de información disponible sobre las características del rayo está basada en estudios realizados en zonas semitropicales o templadas, sin embargo, después de la evidencia del dominio de las tres zonas de convección profunda tropical, en varios países y centros de investigación, se han realizado estudios de la influencia de la latitud, aspectos orográficos y meteorológicos acerca del Rayo, por institutos como la NASA con su Misión TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), el Instituto MIT (Massachusetts Institute of Technology) en USA con investigaciones sobre la Convección Tropical, en Brasil con la red de localización de Rayos de CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), en México con investigaciones sobre Rayos en el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas de México) ², y Colombia ha avanzado en los últimos 15 años con del Programa de investigación PASS-UN de la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Keraunos SAS.

² (Torres & Avila, 2000)

³ (Cruz, Torres, Aranguen, & Inampues)

1. Descripción del proyecto

Para el cumplimiento del proyecto, a continuación, se presentan los objetivos de este trabajo de grado.

1.1. Objetivo general

- Caracterizar la actividad de rayos en el departamento de Santander.

1.2. Objetivo específicos

- Cuantificar la actividad eléctrica atmosférica por municipios y provincias del departamento de Santander.
- Identificar las ubicaciones más favorables en el departamento, para la instalación de una antena de captación y medición de parámetros de rayo.
- Elaborar un mapa de la densidad de descargas a tierra en el departamento de Santander.
- Analizar los resultados obtenidos sobre la actividad de rayos en el departamento de Santander.

1.3. Alcance

El presente abordará el análisis del rayo y su comportamiento en diferentes regiones del departamento de Santander, se desarrollará de manera progresiva alcanzando uno a uno los objetivos propuestos anteriormente, teniendo como prioridad la individualización de la actividad de rayo cuantificada en los municipios, las provincias y el departamento, se identificará la

actividad del rayo en cada zona con respecto a su área, encontrando la cantidad de rayos promedio y los municipios con mayor y menor actividad eléctrica atmosférica en el departamento, seleccionando dentro de los municipios con mayor promedio, la ubicación apropiada de la antena de captación y medición de parámetros del rayo. Se elaborará un mapa mostrando las ubicaciones en el departamento con mayor incidencia de rayo, realizando una cuadrícula en el mapa del departamento y contando los eventos que ocurren en cada área de un kilómetro cuadrado, identificando el parámetro conocido como DDT o Densidad de descargas a tierra (cantidad de rayos anuales por kilómetro cuadrado). Se analizarán los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto, identificando el comportamiento de este fenómeno natural en el territorio santandereano.

1.4. Justificación

Debido a que la literatura con respecto al tema de las descargas atmosféricas está con base en datos y estudios realizados en zonas templadas, nace la necesidad de investigar acerca de este fenómeno natural en la zona tropical, adelantando proyectos de ingeniería logrando caracterizar su comportamiento en nuestro país y estudiar sus parámetros propios, con el fin de realizar el diseño más adecuado con respecto a la actividad eléctrica de cada región.

1.5. Planteamiento del problema

Los fenómenos meteorológicos como el rayo, han sido objeto de estudio a nivel mundial durante varias décadas, con el fin de lograr entender su esencia, causas, comportamiento, alcances y peligros que pueden llegar a generar. En Colombia la apropiación del tema es necesaria para una buena ejecución y el avance de la ingeniería eléctrica del país, donde este fenómeno natural

presenta una gran actividad y sus parámetros pueden llegar a tener valores muy elevados dependiendo de la región, estudios realizados en Colombia evidencian que los parámetros de rayo son propios de pequeñas zonas y no generales para grandes partes del territorio nacional, debido a la formación de nubes y la topografía propia en cada región, surgiendo la necesidad de realizar un estudio específico de este evento natural, analizando la variación de tiempo y espacio en el territorio colombiano.

El resultado más importante que se busca tras la realización de este proyecto de grado es la caracterización de este fenómeno natural y sus propios parámetros en el departamento Santander, obteniendo un registro histórico de la actividad de descargas atmosféricas en la región encontrando las zonas destacables con respecto al comportamiento del rayo en los municipios, buscando relacionar la incidencia de las descargas atmosféricas con la diferencia geográfica en el departamento, teniendo en cuenta que algunos de sus municipios se encuentran en el valle interandino del río Magdalena o la zona conocida como Magdalena medio, la cual presenta la mayor actividad de rayos en Colombia.

1.6. Metodología

Se pretende desarrollar el trabajo de grado en cinco etapas.

- I. Selección de información:** Se elaborará una búsqueda y selección de literatura científica, en libros, artículos, ensayos e investigaciones, adquiriendo conocimiento sobre las descargas atmosféricas, su comportamiento, características, parámetros, con el fin de la apropiación del tema.

- II. Estudio de la información:** Mediante la empresa Keraunos SAS y la red colombiana de detección total de rayos (LINET) se obtuvo una base de datos de descargas atmosféricas en el departamento de Santander de los años 2014-2015-2016-2017. Utilizando un software libre (QGIS) se procesarán y seleccionarán los datos dentro de Santander, con la información de actividad de rayos del departamento se procederá a clasificar los datos en provincias y municipios.

- III. Organización de datos:** Con la información separada se identificará la actividad de rayos individualizada por municipios, mostrando los municipios donde las descargas atmosféricas tienen una mayor actividad, siendo este el objetivo principal del trabajo de grado.

- IV. Ilustración de datos:** Se elaborará el mapa del parámetro de rayo conocido como la densidad de descargas a tierra o DDT, eliminando la multiplicidad de la base de datos de strokes en el departamento de Santander y dejando una base de datos de los flashes para la apropiada obtención de este parámetro.

- V. Análisis:** Se analizarán los resultados obtenidos del comportamiento de este fenómeno natural y sus propios parámetros en el territorio Santandereano, como las horas o los meses donde se presentan mayor y menor actividad de rayos, verificando si a través de los años este comportamiento se mantiene o tiene variaciones, Se desea dejar la información recopilada entendible y concisa para que este trabajo de grado sirva de apoyo para futuras investigaciones.

2. Antecedentes

Anualmente, la incidencia de las descargas atmosféricas directas o indirectas, originan daños e interrupciones en la continuidad del servicio energético, afectando tanto al sector público como al sector privado. Igualmente, los rayos generan alrededor del mundo graves lesiones o muertes a los seres humanos, se estima que aproximadamente 24 mil personas mueren a causa de los rayos en el mundo cada año, vale la pena aclarar que esta cantidad es grande porque engloba efectos indirectos (incidentes con incendios), pero las muertes por impactos directos siguen siendo relativamente bajas, más o menos 1000 personas al año mueren al ser alcanzados por un rayo en el mundo según estudios realizados en Brasil.

Colombia presenta una tasa de mortalidad a causa de los rayos cercana a dos decesos por cada millón de habitantes al año, en los Estados Unidos se presenta una tasa de mortalidad de 0,9 por millón de habitantes al año y en los países europeos se presenta una tasa de mortalidad alrededor de 0,2 muertes por millón de habitantes al año ⁴.

Según estudios realizados recientemente por la Universidad Nacional de Colombia y la empresa Keraunos SAS, la actividad eléctrica atmosférica en Colombia deja un promedio anual de 60 víctimas mortales debido a este fenómeno natural. Para el periodo de tiempo comprendido desde el año de 1997 hasta el año 2014, se identificaron 1173 muertes por rayos según la base de datos del DANE.

⁴ (Cardona, 2016)

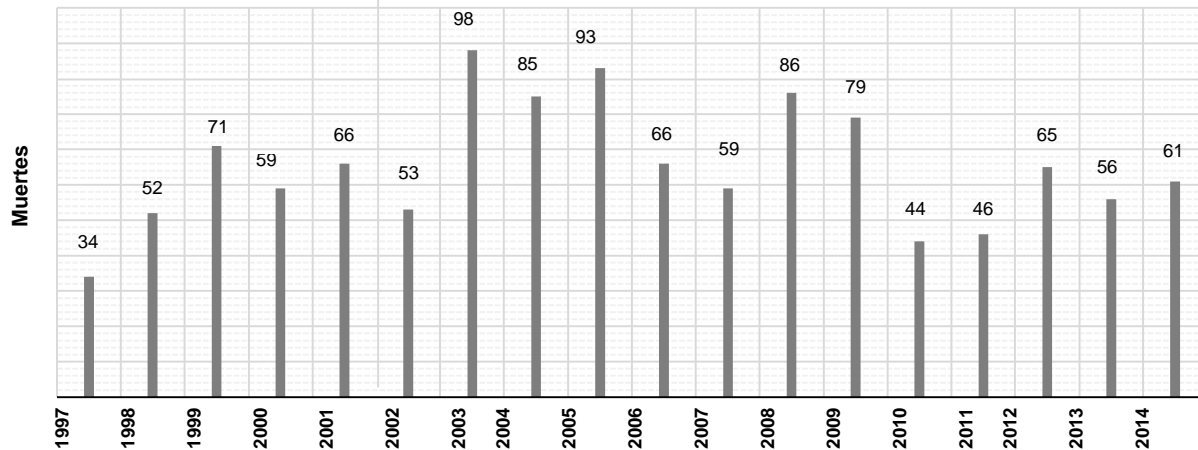


Figura 2. Muertes por rayos durante 18 años en Colombia.

Fuente: (Cruz, Torres, Aranguen, & Inampues)

La Figura 2 presenta la cantidad de personas que fallecieron a causa de las descargas eléctricas durante un período de 18 años en Colombia. 2003 fue el año con más muertes causadas por rayos, con 98 casos, por el contrario, menos de 35 personas murieron en 1997⁵³.

De acuerdo con estudios realizados en la zona intertropical, se espera que los parámetros de rayo en países como Colombia sean superiores a los que se presentan en los países de las zonas templadas.

En la región del bajo Cauca antioqueño se encuentra ubicado Cáceres, ese es el municipio que presenta la más alta actividad eléctrica de Colombia y el cuarto en el planeta. Cáceres es un pueblo con 38000 habitantes y 6600 descargas eléctricas mensuales; en el último año se registró un número cercano a los 80000 rayos en este municipio, alcanzando una densidad de descargas a tierra de 172 rayos por kilómetro cuadrado, un valor 43 veces mayor que el presentado en Bogotá y 80 veces mayor al de los Estados Unidos; en Cáceres una descarga eléctrica es tan

⁵ (Pareja, 2018)

poderosa que podría alumbrar de golpe unos 45000 bombillos, según el investigador Horacio Torres de la Universidad Nacional de Colombia ⁶⁵.

3. Parámetros del rayo

Para propósitos de una buena aplicación de la ingeniería de protección contra rayos, se deben manejar características propias de este fenómeno natural en la zona en la cual se hará el diseño, las normas internacionales y la literatura científica acerca del tema de las descargas eléctricas, sugieren las ecuaciones relacionadas con el Nivel Cerámico (días al año en los cuales al menos se escucha un trueno), pero estas ecuaciones tienen constantes halladas en sitios específicos, de ahí nace la necesidad de conocer el entorno electromagnético y los parámetros propios de la actividad de rayo en cada región, para la realización de diseños y sistemas eléctricos apropiados a las condiciones locales del rayo.

3.1. Nivel Cerámico (NC)

El número de descargas atmosféricas varía en cualquier lugar del mundo y no se ha determinado alguna manera de calcularlo. La información debe ser obtenida con base en datos históricos. El parámetro más simple de la actividad de rayos en una región, es el nivel cerámico o días tormentosos. Se considera día con tormenta los días en los cuales se escucha al menos un trueno, la cantidad de días al año en los que se presentó una tormenta son el nivel cerámico de dicha región.

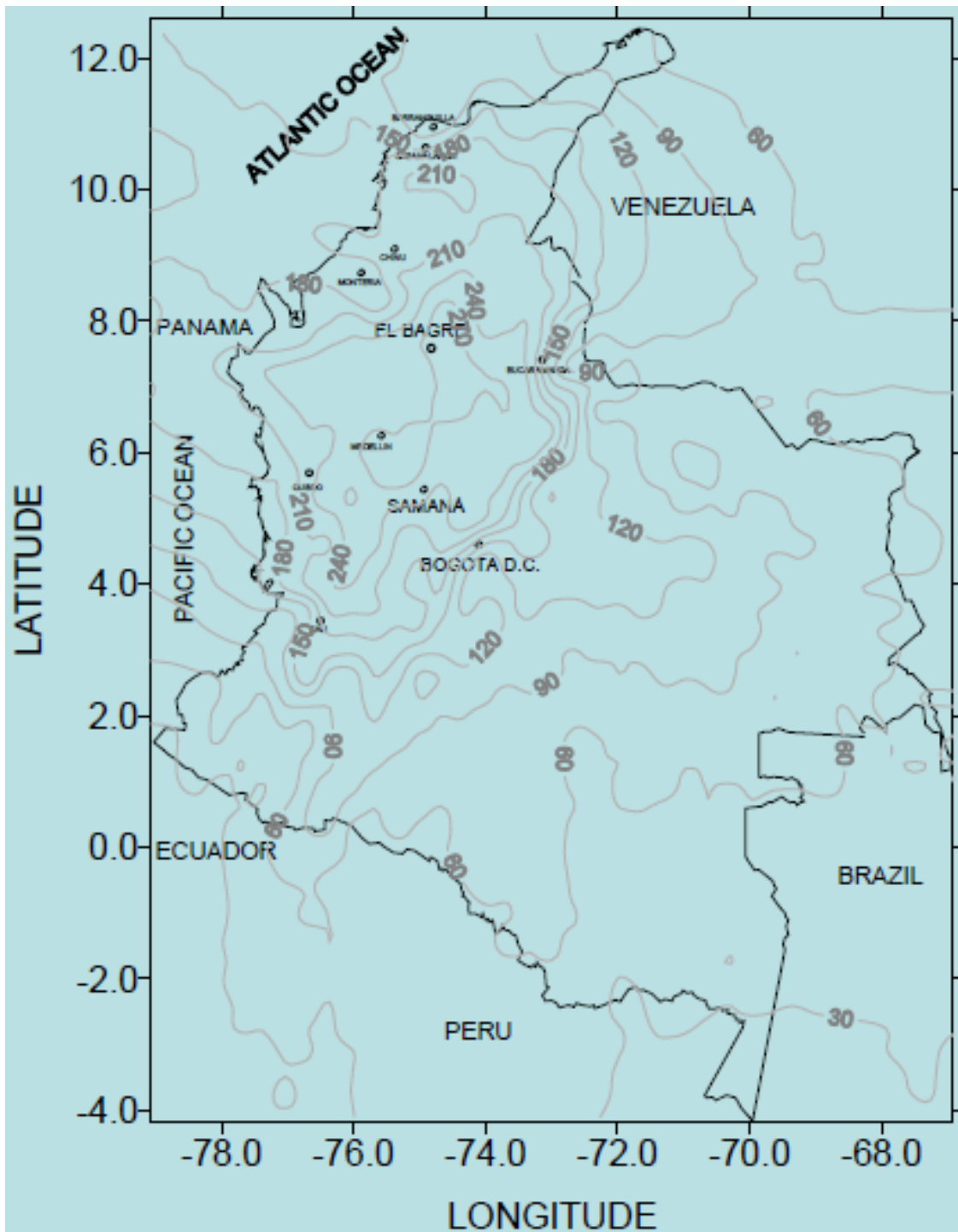


Figura 3. Mapa de Nivel Cerámico de Colombia.
Fuente: (Pareja, 2018)⁵

⁵ (Pareja, 2018)

Los niveles cerámicos sirven para la construcción de los mapas que representan las curvas de nivel cerámico, estas líneas describen geográficamente las zonas donde el riesgo de actividad de rayos es mayor o menor. Estos mapas no evidencian parámetros de duración o extensión de la tormenta, pero si dan un valor de las tormentas ocurridas y establecen parámetros de importancia en la información registrada.

3.2. Densidad de Descargas a Tierra (DDT)

La Densidad de Descargas a tierra o DDT se define como la cantidad de rayos que inciden en un kilómetro cuadrado por un periodo de tiempo de un año. La DDT se utiliza para cuantificar la actividad de rayos en una zona, este es el parámetro más relevante de unidades de superficie y tiempo en las descargas atmosféricas, demostrando la incidencia de una descarga eléctrica en un punto del terreno en específico y complementa al parámetro “nivel cerámico” ya mencionado anteriormente.

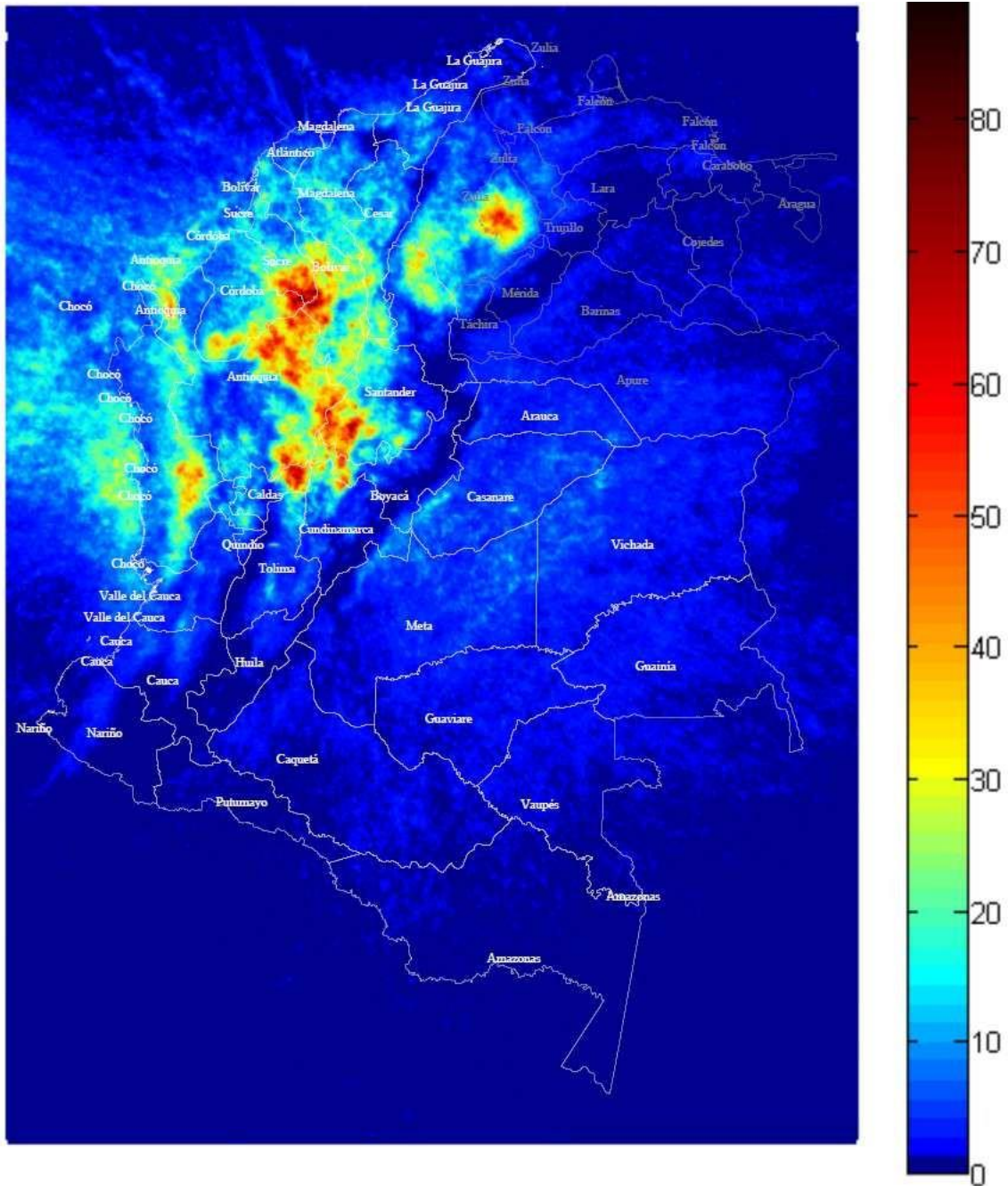


Figura 4. Densidad de Descargas a Tierra (Rayos/km²año) medida en Colombia y parte de Venezuela en 2012. Fuente: (Keraunos, 2015)⁷.

La DDT es a menudo considerada como el principal descriptor de la incidencia de rayos, al menos en los estudios de protección contra rayos, en la figura 4 se evidencia que en la zona central colombiana se presenta una gran actividad eléctrica atmosférica.

⁷ (Keraunos, 2015)

La densidad de descargas a tierra, se relaciona al nivel cerámico por la fórmula:

$$DDT = K * NC^a$$

Donde las constantes K y a son halladas empíricamente para una región en específico.

3.3. Multiplicidad (M)

La multiplicidad se puede definir como el número de descargas eléctricas individuales que componen un rayo o flash, cada descarga individual se conoce comúnmente como stroke, una descarga eléctrica se compone de varias descargas subsecuentes que puede tardar desde algunos milisegundos hasta medio segundo.

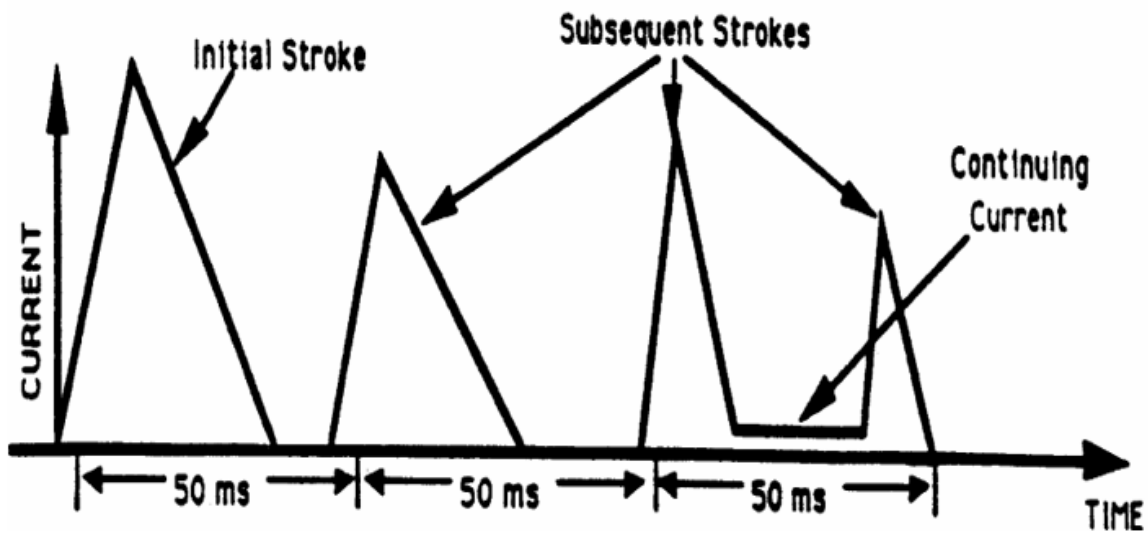


Figura 5. Tiempos para establecer los strokes en una misma descarga.

Fuente: (Aponte, 2009)⁸

Normalmente en un rayo se pueden presentar de 3 a 6 strokes que ocurren en el mismo canal de aire ionizado producido por la descarga principal o inicial que presenta mayores parámetros.

⁸ (Aponte, 2009)

Para la obtención del parámetro de la Densidad de Descargas se tienen en cuenta los registros de los flashes y no de los strokes, a partir de los contadores de rayos en los sistemas de localización y detección de rayos.

4. Sistemas de localización y detección de Rayos

Se puede decir que en un momento dado se producen cerca de 2.000 tormentas y más de 100 descargas por segundo alrededor del mundo, convirtiéndose de vital importancia incrementar el conocimiento acerca de las descargas eléctricas y de nuestro entorno electromagnético², para comprender mejor su comportamiento particular en zonas específicas y la óptima aplicación de la ingeniería de prevención, detección y protección contra rayos.

La detección de descargas eléctricas y sus parámetros asociados son una herramienta dentro del campo de la meteorología, dando alertas sobre la aparición y acercamiento de una tormenta eléctrica. La información hallada es utilizada para el pronóstico, análisis de tormentas, avisos a zonas vulnerables e industrias donde su trabajo puede verse afectado como en aeropuertos, minas, campos petroleros, entre otros.

4.1. Redes de localización en Colombia

En 1997 se instaló la primera red de detección de rayos en Colombia, la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas – RECMA estuvo bajo la dirección del grupo PAAS grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia, que

² (Torres & Avila, 2000)

detectaba rayos nube-tierra. La red RECMA estuvo en operación en los años 1997 y 2001, estaba conformada de 6 sensores LPATS - *Lightning Position and Tacking System*, que se instalaron en el territorio colombiano como lo muestra la figura 6.



Figura 6. Red Colombiana de Medición y Localización RECMA.

Fuente: " (Torres & Avila, 2000)²

² (Torres & Avila, 2000)

Posteriormente la red fue actualizada con los sensores LS7001 (*Lightning Sensor 7001*) y se convirtió en el Sistema de información de Descargas Atmosféricas – SID, este sistema fue auspiciado por varias empresas del sector eléctrico, principalmente ISA, razón por la cual quedo bajo su administración, aunque con un acceso a la información permitido para la Universidad Nacional con el propósito de adelantar investigaciones⁶.

La RECMA encabezo la investigación de los parámetros del rayo en el territorio colombiano y era una de las pocas redes de localización de rayos en países tropicales, las otras redes de referencia estaban en los países de Venezuela, Brasil y Costa Rica. Esta red tuvo una importante cobertura del país, con su mayor capacidad de detección en la zona de más actividad de rayos en Colombia que es la zona del Magdalena Medio, al contrario, sus limitaciones estaban dadas por una baja sensibilidad, ocasionando que no se pudieran detectar descargas atmosféricas de corrientes inferiores a los 10 kA y adicionalmente la red no era capaz de detectar rayos nube-nube.

Con base en los datos que arrojó esta red se hicieron las primeras caracterizaciones de parámetros de rayo en Colombia, en su tesis de maestría en el 2002 el ingeniero Camilo Younes⁹ encontró que la Densidad de Descargas a Tierra en Colombia estaba por encima de los referentes internacionales que se tenían en ese momento, alcanzando valores máximos de 34 rayos/km²año.

En 2011 entró en operación en Colombia la red Europea LINET, la cual tiene la capacidad de detectar la actividad total de rayos (rayos nube-tierra y rayos intranube). Desde su instalación septiembre de 2011 hasta la fecha la red ha detectado más de 64000000 de descargas.

⁶ (Keraunos, 2015)

⁹ (Younes, 2002)

4.2. Red Colombiana de Detección Total de Rayos – LINET

En Colombia el sistema de detención de rayos con la mayor cobertura y desempeño es la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (LINET), con más de 15 sensores en diferentes partes del país que cubren la mayoría del territorio colombiano, proporciona información histórica y también información en tiempo real con una alta eficiencia en la detección.

En 2011, Keraunos (empresa spin-off derivada del grupo PAAS) instaló una nueva red de detección total de rayos LINET, La red LINET inicialmente contaba con seis sensores ubicados en Bogotá, Ibagué, Tunja, Rio Negro Antioquia, Barrancabermeja y Montería, en 2012 fue ampliada con tres nuevas estaciones en Cúcuta, Campo Rubiales y Barranquilla. En enero del 2013 se instaló la décima estación en Pasto, en 2014 se instalaron cuatro estaciones en Cali, Neiva, Arauca y Cerrejón, posteriormente en el 2015 estaba en proceso de puesta en operación la estación de La Jagua (Cesar) y dos puntos más a ser instalados en Yopal y La Dorada.

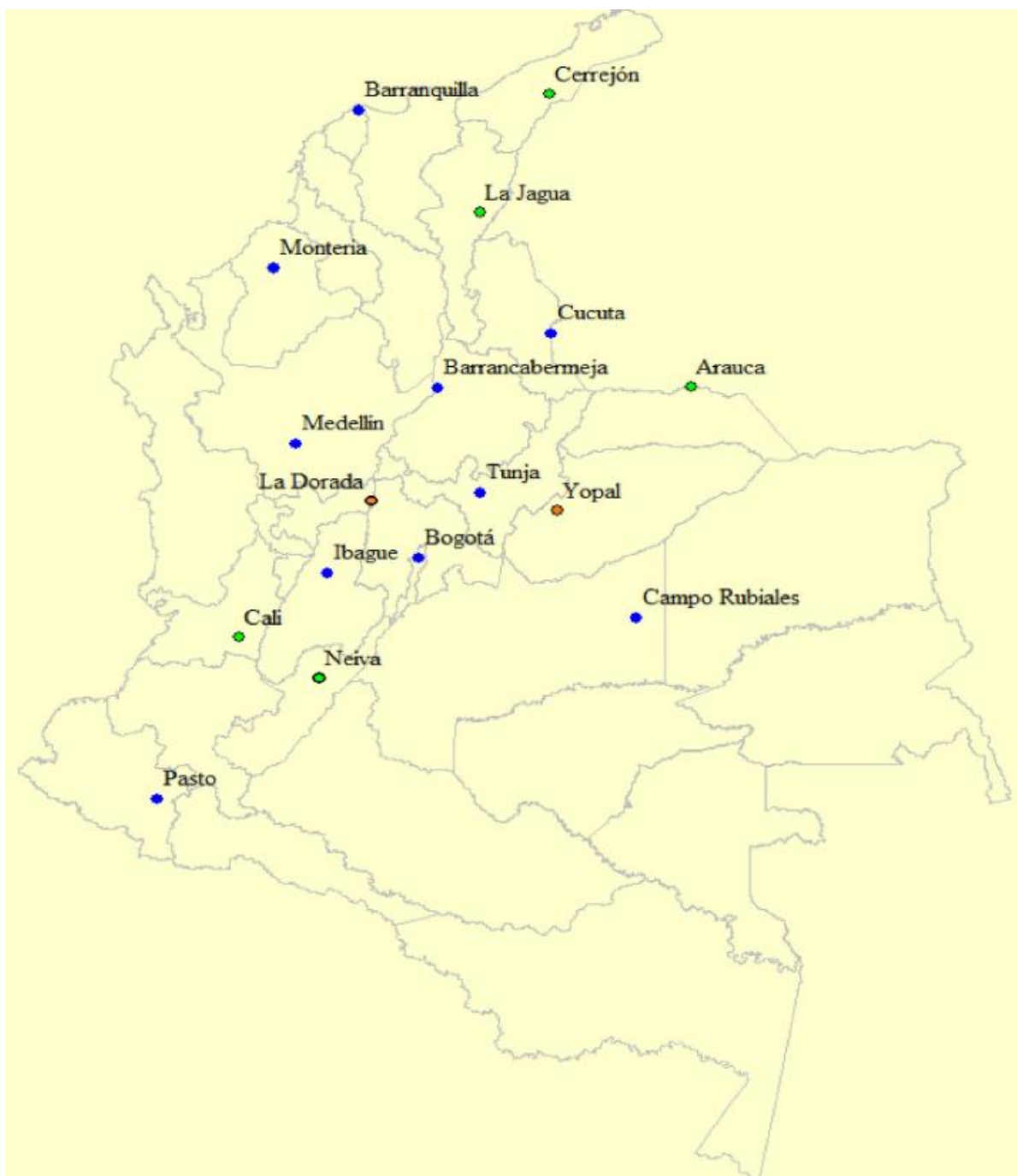


Figura 6. Red de Localización de Rayos – LINET año 2015

Fuente: (Keraunos, 2015) ⁶

⁶ (Keraunos, 2015)

Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF (Very Low Frequency) / LF (Low Frequency), una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal.



(a)

(b)

Figura 7. Antena de campo magnético (a) Unidad de procesamiento local (b).
Fuente: (Keraunos, 2015)⁶

Por las características tecnológicas asociadas con la detección eficiente de actividad “Total de Rayos” (En inglés: Total Lightning), ésta nueva red permite implementar herramientas y algoritmos para realizar, además de la localización de rayos, la detección temprana o nowcasting de tormentas eléctricas, con aplicación directa en la predicción y usos en la prevención de muerte de personas y daños instalaciones⁶.

Cuando ocurre alguna descarga, sea intranube o nube-tierra, las estaciones de medida registran la forma de onda del campo magnético y su estampa de tiempo, estos datos son enviados en tiempo real a una Unidad de Procesamiento Central, allí se procesa el algoritmo de

⁶ (Keraunos, 2015)

detección; este algoritmo identifica el tipo de descarga (intranube o nube-tierra) y determinan su ubicación, amplitud, polaridad y altitud si es una descarga intranube.

4.2.1. Datos suministrados. Todas las estaciones envían a la base de datos la actividad eléctrica en tiempo real hasta el procesamiento central, en la que se calculan las soluciones de las que se obtienen los siguientes parámetros para cada descarga⁶:

- Ubicación (latitud y longitud, con errores de localización medio del orden de 200 m en la zona de mayor eficiencia).
- Eficiencia de detección (> 90% para rayos nube-tierra (CG))
- Tiempo (con una precisión de 100 ns).
- Discriminación (rayo nube tierra (CG) o intranube (IC)).
- Amplitud de la corriente de retorno.
- Altura de emisión.
- Polaridad.
- Error en la detección.
- Forma de onda.

Estos datos son fundamentales para obtener los parámetros de rayo.

4.2.2. Eficiencia de la red. La técnica de detección utilizada en la red LINET, tanto como para las descargas intranube y las descargas nube-tierra, está basada en la técnica del tiempo de

⁶ (Keraunos, 2015)

arribo TOA – time of Arrival usando unas modificaciones para obtener resultados en 3D, proporcionando información sobre su posición horizontal (latitud y longitud) y su posición vertical (altitud), adicionalmente, los rayos con corrientes menores a 10 kA son detectables; esto genera una mejora substancial en la eficiencia de la detección de rayos. En la figura 9 se puede apreciar que en la zona central de Colombia predomina la detección de rayos con una corriente por encima de los 6 kA a 8 kA, pero hay pequeñas ubicaciones donde se pueden detectar rayos hasta con una corriente mínima de 2 kA y en zonas del Magdalena Medio y de la Llanura del Caribe se pueden detectar rayos con una corriente mínima de 4 kA.

La corriente mínima detectable se puede traducir como eficiencia de detección, en la Figura 10 se muestra la zona de alta eficiencia (azul) y media eficiencia (naranja) en la detección de rayos, estas eficiencias corresponden al momento donde la red LINET se componía de 10 sensores. La región de alta eficiencia corresponde a la zona central de Colombia y la región de media eficiencia comprende la mayoría del territorio colombiano y otros países (Panamá y Venezuela) excepto la Amazonia.

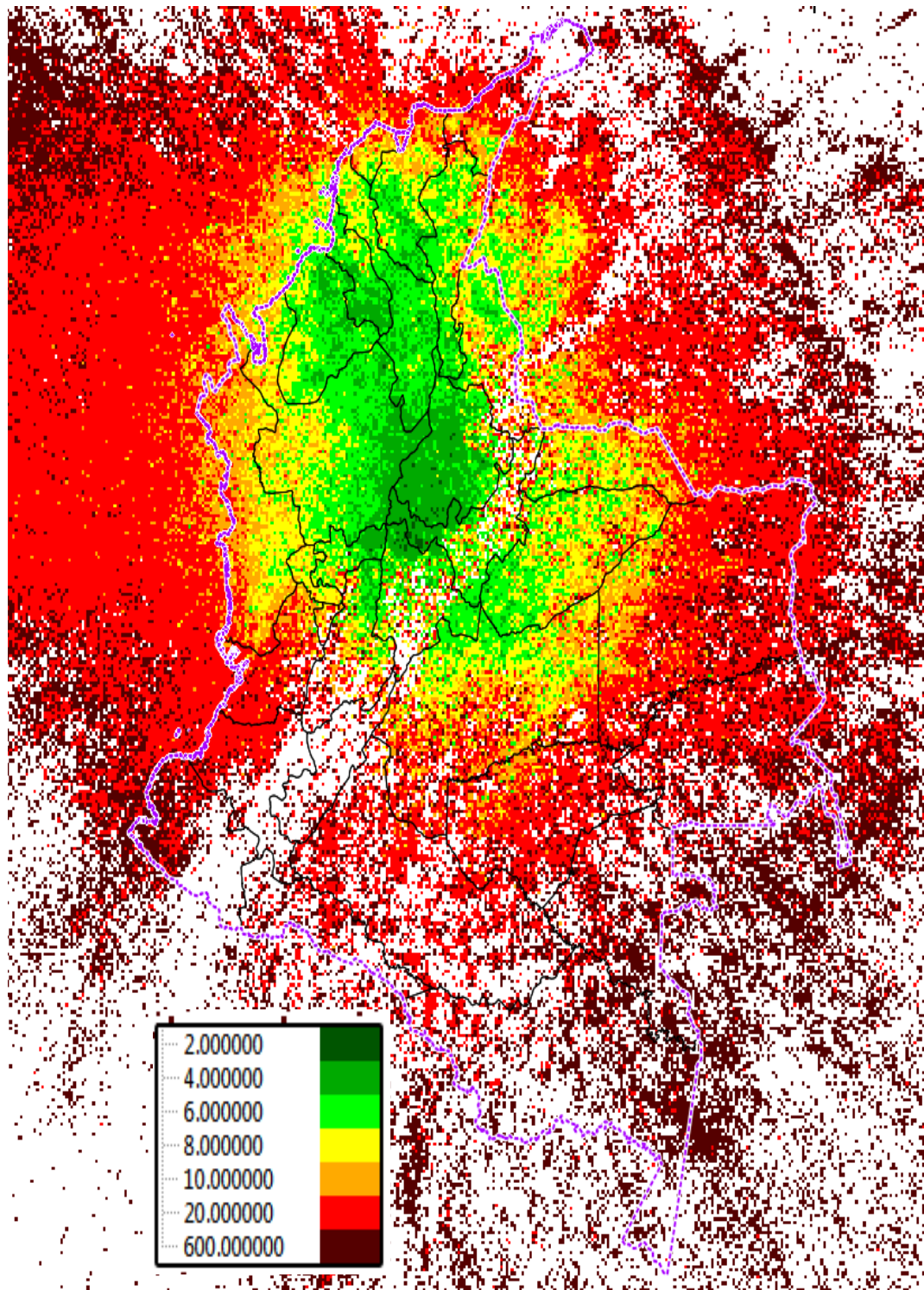


Figura 8. Amplitud de la corriente de Rayo mínima detectable, dada en amperios.
Fuente: (Keraunos, 2015)⁶

⁶ (Keraunos, 2015)

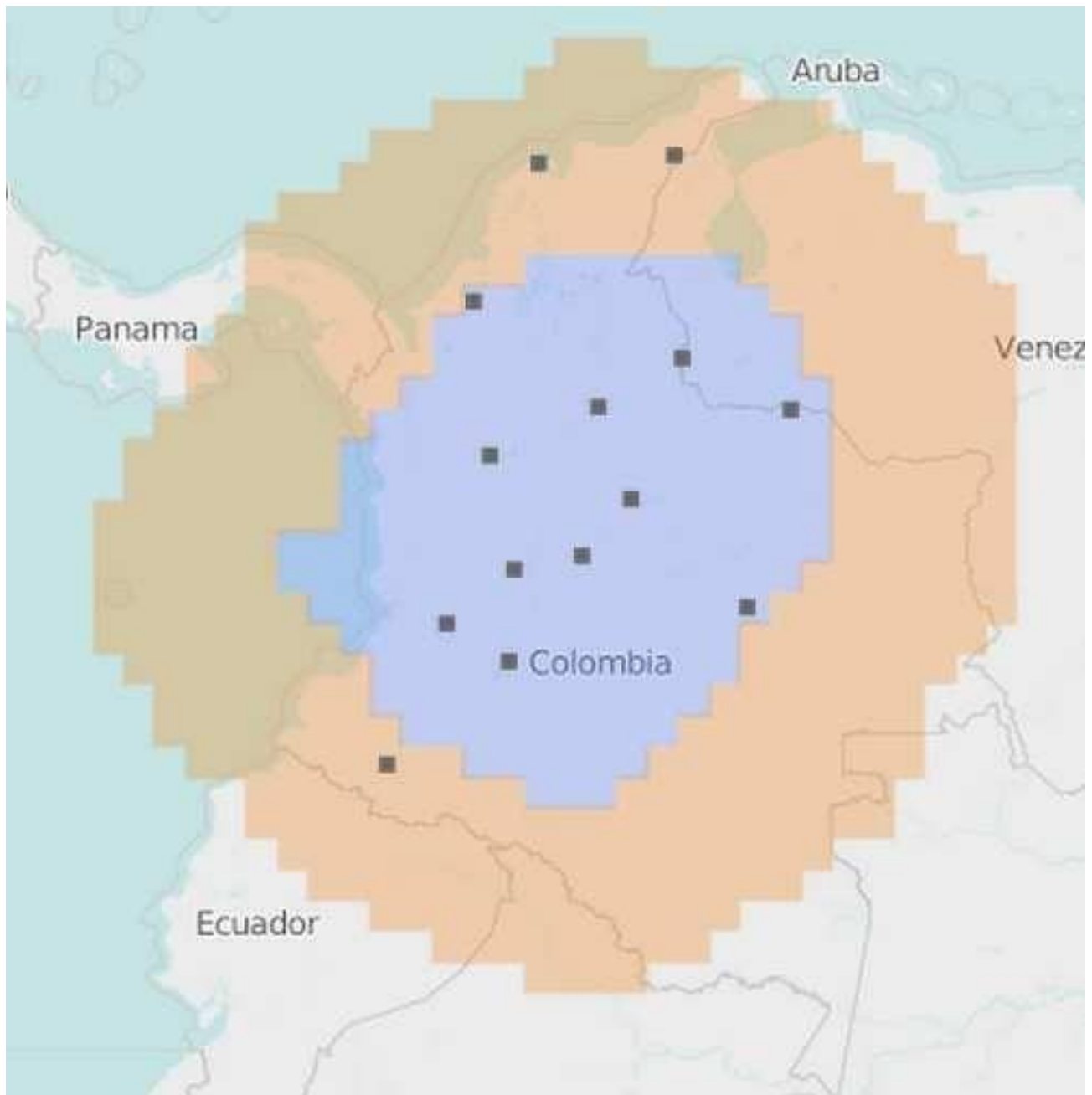


Figura 9. Capacidad de detección de la red LINET
Fuente: (Keraunos, 2015)⁶

La separación entre dos sensores de la red LINET en el territorio colombiano varía entre 120 a 420 km.

⁶ (Keraunos, 2015)

Gracias a la red LINET se han podido adquirir los datos históricos de actividad de rayos en el departamento de Santander, los cuales son la base fundamental para la realización de este trabajo de grado.

5. Software QGIS

QGIS es un sistema de información Geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License, siendo un proyecto de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Desde el inicio del proyecto en el año 2002, QGIS ha evolucionado llegando a ser un programa GIS que cubre la mayor parte de las necesidades del usuario en visualización de datos. Se puede ejecutar sobre los sistemas operativos Microsoft Windows, Mac OSX, GNU/Linux, UNIX y Android, y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

QGIS ofrece muchas funcionalidades SIG comunes proporcionado por las características principales y complementos, se puede crear, modificar, visualizar información geoespacial, importar y exportar archivos de datos de otros formatos; por medio de la importación de archivos de texto delimitado nos permitió ubicar los datos de las coordenadas GPS de la base de datos de la actividad de rayos brindados por la red LINET de la zona que contenía el departamento de Santander dentro de ella (Margen inferior-izquierdo Latitud: 5°28'26.25"N, Longitud: 74°39'13.20"O; Margen superior-derecho Latitud: 8°37'22.60"N, Longitud: 72°23'40.31"O), usando las herramientas de selección por localización de QGIS, se procesaron los datos descartando los strokes que no incidían en el departamento y se logró

individualizar la actividad dentro de cada municipio o provincia de Santander para realizar un estudio más específico.

La versión que se usó para el desarrollo de este trabajo de grado fue QGIS 2.18 Las Palmas de Gran Canaria, la cual se lanzó en el año 2016, se nombró Las Palmas ya que fue la ciudad anfitriona de la catorceava reunión en noviembre del 2015, otras versiones también han llevado el nombre de la localidad terrestre de la reunión anterior como: Wrocław, Lisboa, Dufour, Valmeira, Brighton, Wien, Pisa, Lyon, Essen, y Nodebo, la razón de nombrar las de QGIS es para disminuir los riesgos legales.

A continuación, en la figura 11 se puede apreciar la interfaz del programa con varios shapefiles. Un shapefile es un almacenamiento digital de la localización geográfica del software, para lograr visualizar de todos los shapefiles, el shapefile de los strokes 2014 se ubicó detrás.

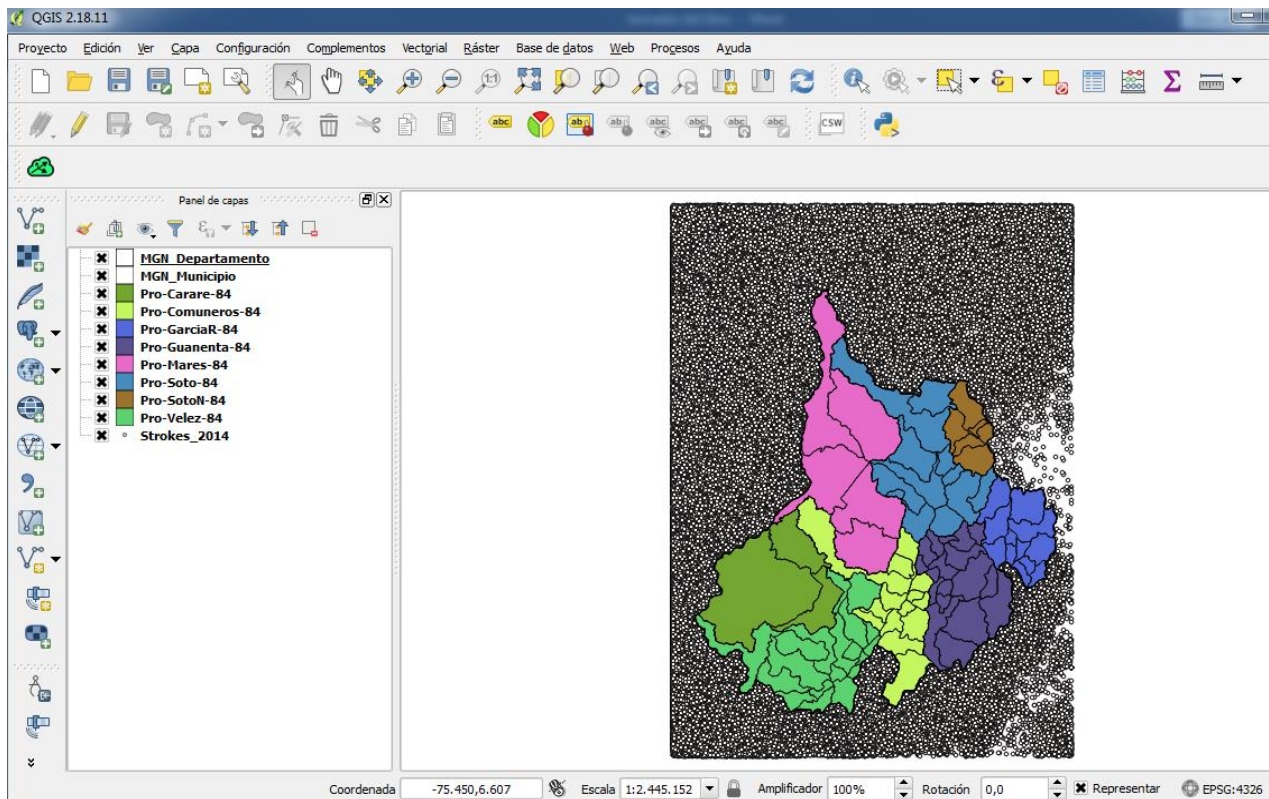


Figura 10. Interfaz Software QGIS.

Fuente: Autor.

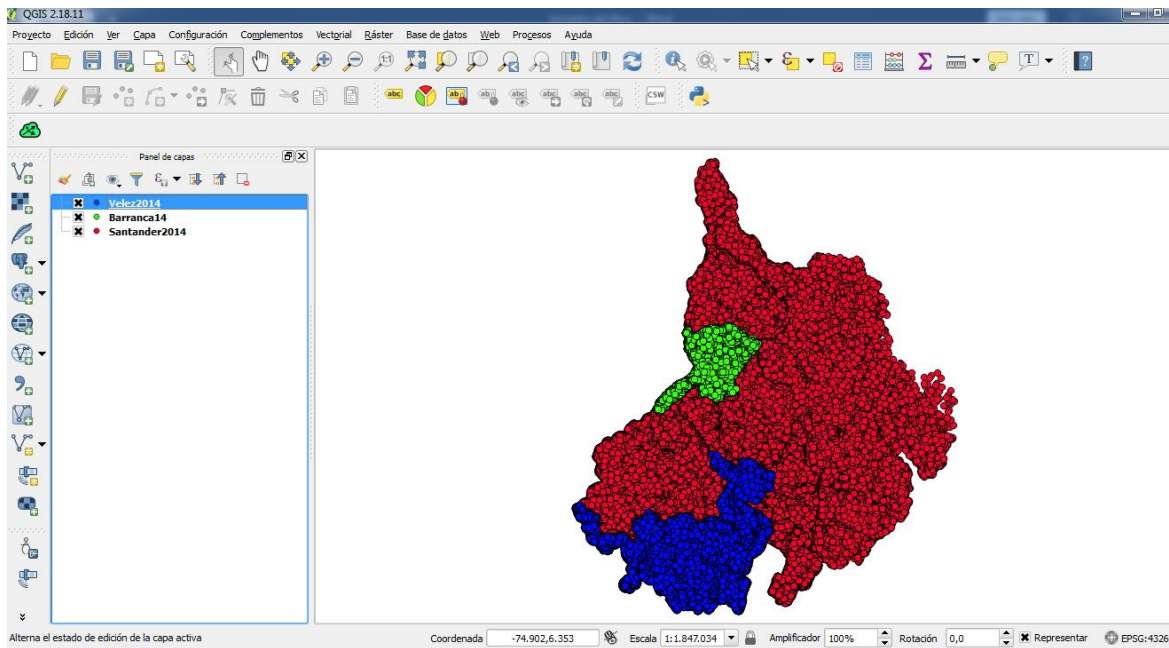


Figura 11. Selección de datos por localización en QGIS.
Fuente: Autor.

En la figura 12 se aprecia la selección de las descargas del año 2014 en el departamento de Santander (Rojo), en la provincia de Vélez (Azul) y en el municipio de Barrancabermeja (Verde). Se visualiza el proceso para el almacenamiento de datos en todos los municipios por cada año de estudio, sirviendo para la investigación de este trabajo de grado.

Se identificaron los datos de los flashes en el departamento de Santander de la base de datos de strokes como se explica en la sección 6.2; seleccionando los datos de los rayos que incidieron dentro del departamento de Santander se realizó el estudio de las DDT, con los datos anuales filtrados se sobrepuso una grilla en el shapefile de los rayos de cada año y contando la incidencia dentro de cada recuadro se identificó con exactitud cuántos rayos ocurren en cada una de estas secciones con un 1 km² de área.

6. Actividad de rayos en Santander

Con el objetivo de identificar los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander, se ejecutaron dos procedimientos de conteo con la lista de datos que incluyen valores de fechas, horas, minutos, segundos, coordenadas GPS, corriente y error de cada descarga, esta base de datos fue registrada por los sensores de rayos pertenecientes a la Red LINET de la empresa Keraunos, la cual permitió trabajar con esta información con fines investigativos.

El departamento de Santander está conformado por 87 municipios que se agrupan en 8 provincias, en la figura 13 se visualizará la división política de Santander y los municipios que conforman cada provincia.



Figura 12. División política de Santander.
Fuente: Vanguardia Liberal¹⁰

¹⁰ (VanguardiaLiberal, 2009)

6.1. Densidad de descargas por área

En el primer procedimiento de conteo, se tuvieron en cuenta todas las descargas que incidieron en el departamento Santander, en otras palabras, el estudio se realizó a partir del análisis de los strokes en el territorio santandereano, individualizando la actividad de rayos en su respectiva área, como en los municipios, las provincias y el departamento de Santander, identificando la cantidad de strokes que inciden al año respecto al área de cada zona se obtiene el parámetro densidad. Además, se realizó una comparación equivalentemente entre los municipios con grandes y pequeñas áreas en relación a su actividad de rayos.

Usando las herramientas de investigación de QGIS y su selección por localización, se identificaron los datos de la actividad de rayos en cada una de las secciones, se realizó la tabulación en Excel y se procesaron los datos logrando evidenciar los municipios con mayor y menor densidad de rayos en su propia extensión. Las tablas 1 y 2 se generaron a partir de la base de datos de strokes en Santander.

Tabla 1.

Tablas de Densidad alta de Strokes por área en municipios. Años 2014-2015-2016-2017.

2014	Rayos	Área	Densidad	2015	Rayos	Área	Densidad
Gambita	21.482	543,9	39,49	Cimitarra	252.758	3.214,8	78,62
Oiba	10.671	287,2	37,15	Bolívar	68.036	1.025,3	66,36
Cimitarra	115.544	3.214,8	35,94	Suaita	17.696	293,6	60,28
Suaita	10.380	293,6	35,36	Puerto Parra	45.674	772,4	59,14
Puerto Parra	26.935	772,4	34,87	Landázuri	31.584	619,7	50,97

2016	Rayos	Área	Densidad	2017	Rayos	Área	Densidad
Cimitarra	358.852	3.214,8	111,63	Bolívar	124.613	1.025,3	121,54
Bolívar	96.613	1.025,3	94,23	Cimitarra	263.922	3.214,8	82,10

Puerto Parra	55.652	772,4	72,06	Puerto Parra	57.306	772,4	74,20
Landázuri	42.265	619,7	68,21	Barranca-bermeja	85.633	1.255,1	68,23
Suaita	19.459	293,6	66,28	Gambita	36.162	543,9	66,48

Tabla 2.

Tablas de Densidad baja de Strokes por área en municipios. Años 2014-2015-2016-2017.

2014	Rayos	Área	Densidad	2015	Rayos	Área	Densidad
Cerrito	149	429.1	0.35	Cerrito	173	429.1	0.40
Vetas	52	94.6	0.55	Vetas	53	94.6	0.56
Floridablanca	78	100.1	0.78	Concepción	266	340.7	0.78
Concepción	267	340.7	0.78	Tona	374	348.9	1.07
Los Santos	313	294.2	1.06	Carcasí	383	261.6	1.46

2016	Rayos	Área	Densidad	2017	Rayos	Área	Densidad
Vetas	89	94.6	0.94	Cerrito	244	429.1	0.57
Cerrito	479	429.1	1.12	Concepción	645	340.7	1.89
Tona	462	348.9	1.32	Tona	695	348.9	1.99
Concepción	527	340.7	1.55	Vetas	215	94.6	2.27
Carcasí	487	261.6	1.86	Guaca	778	309.7	2.51

Municipios como Cimitarra, Landázuri, Puerto Parra, Barrancabermeja, Bolívar que limitan con el río Magdalena y municipios como Oiba, Suaita, Gámbita, Charalá una pequeña zona ubicada al sur del departamento limitando con el centro del departamento de Boyacá, muestran la mayor actividad eléctrica en Santander; por el contrario, los municipios ubicados al Este del departamento limitando con la unión de los departamentos de Norte de Santander y Boyacá (Vetas, Tona, Surata, Guaca, Carcasí, Cerrito, Concepción) presentan la menor actividad eléctrica.

Tabla 3.*Tablas de Densidad de Strokes por área en provincias. Años 2014-2015-2016-2017.*

2014	Rayos	Área	Densidad	2015	Rayos	Área	Densidad
Carare	157,263	4,606.8	34.14	Carare	330016	4,606.8	71.64
Comuneros	93,961	3,385.7	27.75	Comuneros	137199	3,385.7	40.52
Vélez	114,158	4,487.7	25.44	Vélez	178304	4,487.7	39.73
Mares	110,148	6,312.0	17.45	Mares	238703	6,312.0	37.82
Guanentá	36,505	3,866.7	9.44	Guanentá	51792	3,866.7	13.39
Soto	28,122	4,880.2	5.76	Soto	52526	4,880.2	10.76
Soto Norte	1,951	1,231.7	1.58	Soto Norte	2444	1,231.7	1.98
García Rovira	3,170	2,280.6	1.39	García Rovira	4310	2,280.6	1.89

2016	Rayos	Área	Densidad	2017	Rayos	Área	Densidad
Carare	456769	4,606.8	99.15	Carare	358574	4,606.8	77.84
Vélez	240266	4,487.7	53.54	Vélez	252356	4,487.7	56.23
Comuneros	143362	3,385.7	42.34	Mares	296435	6,312.0	46.96
Mares	229698	6,312.0	36.39	Comuneros	156305	3,385.7	46.17
Guanentá	65044	3,866.7	16.82	Soto	89356	4,880.2	18.31
Soto	71287	4,880.2	14.61	Guanentá	59463	3,866.7	15.38
Soto Norte	3973	1,231.7	3.23	Soto Norte	3880	1,231.7	3.15
García Rovira	5588	2,280.6	2.45	García Rovira	6530	2,280.6	2.86

Tabla 4.*Tablas de Densidad de Strokes por área en Santander. Años 2014-2015-2016-2017.*

Santander	Rayos	Densidad
2014	545.278	17,560
2015	995.294	32,053
2016	1'215.987	39,160
2017	1'222.899	39,383

Era de esperarse que las provincias donde se encuentran los municipios con la mayor actividad de rayos estuvieran en los primeros lugares y las provincias donde están los municipios con la menor actividad de rayos estuvieran en la cola de lista, por ejemplo, la provincia de Carare tiene los municipios de Cimitarra, Puerto Parra y Landázuri, la provincia de Comuneros tiene municipios como Suaita, Gambita y Oiba, la provincia de Vélez con Bolívar y la provincia de Mares con Barrancabermeja que son municipios que aparecen en la lista de los municipios con mayor incidencia de rayos en Santander y las provincias ubicadas al oriente del departamento como las provincias de Soto Norte y García Rovira que contienen los municipios que encabezan las tablas de la menor incidencia de rayos en el departamento. (Soto Norte con Tona y Vetas) (García Rovira con Carcasí, Concepción y Cerrito)

En la densidad de descargas por área en las provincias se evidencia que la actividad de rayos decrece hacia el oriente del departamento. Las provincias de Soto y Guanentá tienen una de las incidencias intermedias, estas dos provincias están ubicadas en el centro del departamento, cabe destacar que en la provincia de Soto están ubicados los municipios de Floridablanca, Girón, Piedecuesta y la capital santandereana Bucaramanga que son municipios representativos del departamento y la provincia de Guanentá contiene los municipios que son los destinos turísticos de Santander como San Gil, Socorro, Barichara, Charalá, Curití entre otros.

Se evidencia en la figura 14 que la actividad de rayos en el departamento de Santander ha aumentado considerablemente desde el año 2014 hasta el 2017 con un incremento porcentual de más de un 200%, lo que motiva que las investigaciones acerca de este fenómeno sigan progresando y generando nuevas tendencias en Colombia y en el territorio santandereano.

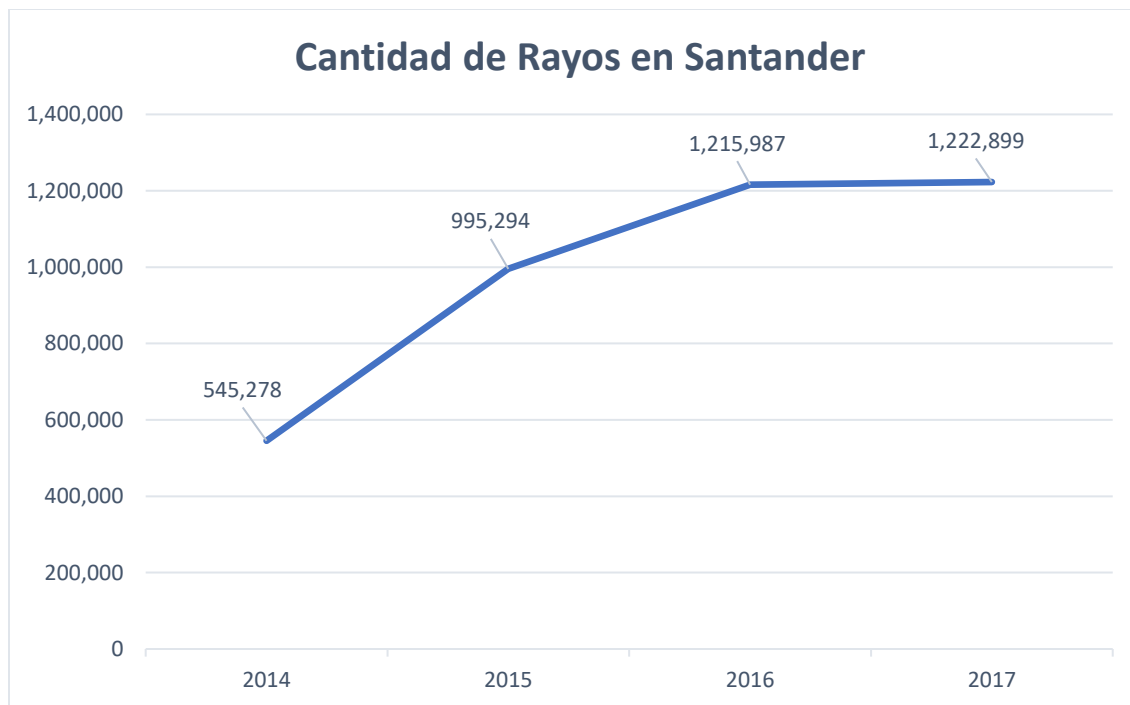


Figura 13. Crecimiento en la incidencia de Rayos.
Fuente: Autor.

Para los análisis realizados en esta etapa que fueron las densidades por área y el análisis de tiempo que se mostraran a continuación se tomaron todos los strokes que inciden dentro del departamento de Santander. Por el contrario, en la sección 6.2 se presentará el segundo método de conteo en el cual se identificarán los rayos.

Con el fin de conocer el comportamiento del rayo en Santander, se decidió establecer las horas y los meses donde es mayor la actividad eléctrica, para encontrar las horas, se clasificó la actividad de rayos en tres grupos cada uno de 8 horas, el primer grupo es de las 0-7 horas, el segundo grupo de las 8-15 y por último el tercer grupo de 16-23.

Tabla 5.

Cantidad de rayos por horas en 2014, 2015, 2016 y 2017.

Cantidad de Rayos por hora

Horas	2014	2015	2016	2017
0-7	276.128	574.981	737.740	721.510
8-15	102.403	166.114	182.398	171.206
16-23	166.747	254.199	295.849	330.183

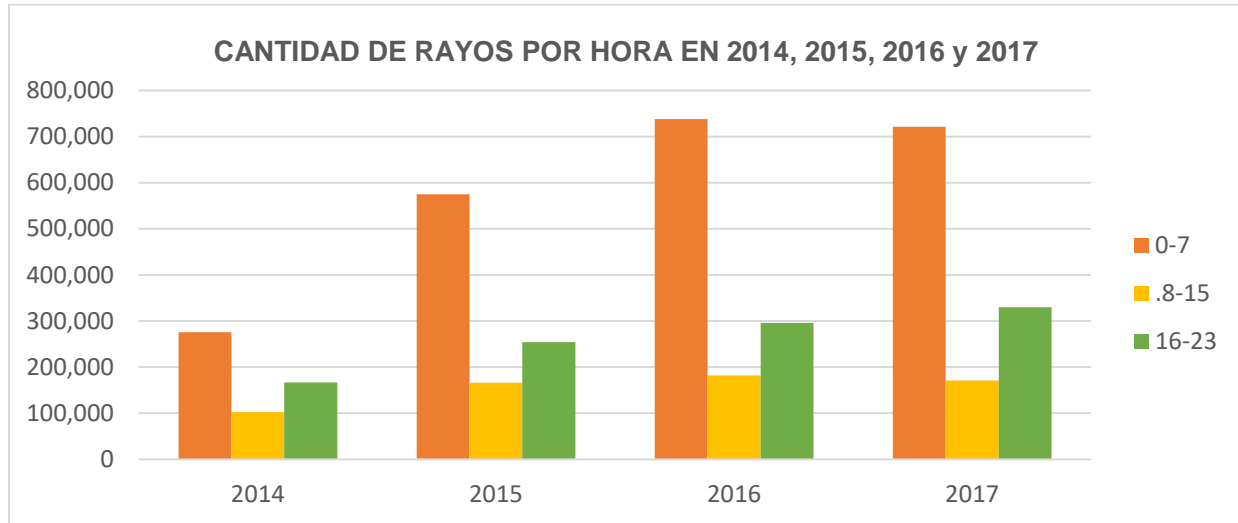


Figura 14. Grafica Cantidad de rayos por horas en 2014, 2015, 2016 y 2017.

Fuente: Autor.

En los resultados se aprecia que más del 56% de la actividad de rayos en Santander ocurren en horas de la madrugada, un 27% en el periodo de la noche y tan solo un 17% ocurren durante la mañana.

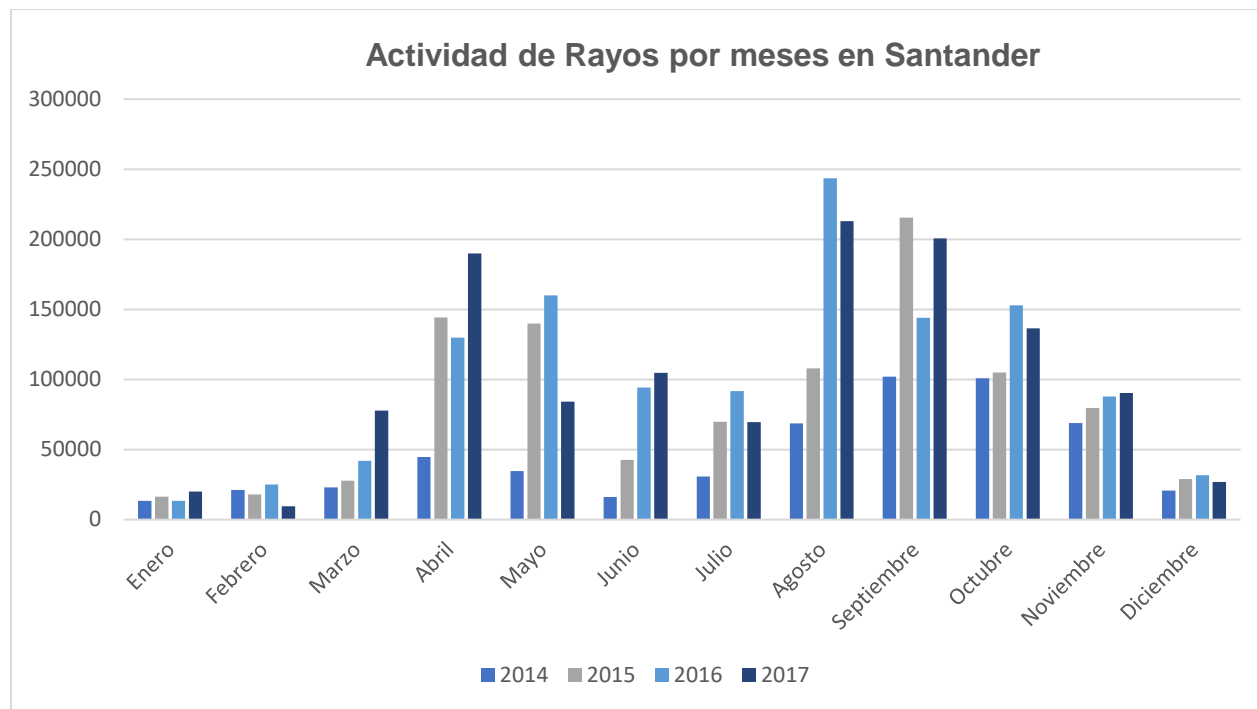


Figura 15. Cantidad de rayos por meses en 2014, 2015, 2016 y 2017.
Fuente: Autor.

En los resultados obtenidos de los meses con respecto a la actividad de rayos durante los años 2014, 2015, 2016, y 2017 en el departamento de Santander se evidencia que las actividades eléctricas promedio más altas las encontramos en los meses de abril, mayo, agosto, septiembre y octubre; los meses de junio, julio y noviembre presentan una actividad media como lo muestra la figura 16.

Teniendo en cuenta el estudio de los rayos en el departamento de Santander por meses y horas, se confirma lo descrito por el Profesor Horacio Torres Sánchez en un artículo para el periódico EL ESPECTADOR⁴ el cual menciona: “En el caso colombiano, en la zona central (Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Caldas, Quindío, Risaralda, Valle y los Llanos) la actividad de rayos es más intensa durante los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. En

⁴ (Cardona, 2016)

la zona caribe colombiana durante los meses de julio-octubre y en la zona sur (Amazonas, Cauca, Putumayo) durante los meses de diciembre y enero. En las tres zonas descritas generalmente se presenta la actividad de rayos entre las dos y las seis de la tarde y en algunas zonas especiales como el Magdalena Medio y la Sierra Nevada, en horas de la noche y la madrugada”.

6.2. Densidad de Descargas a Tierra en Santander (DDT)

En el segundo procedimiento de conteo, se realizó, hallando el parámetro de rayo conocido como la Densidad de Descargas a Tierra o DDT. Para el análisis de este parámetro se procesaron los strokes de la base de datos de la red LINET, identificando los rayos, en otras palabras se elimina la multiplicidad de los eventos; seguido a eso se procesaron los datos en Matlab mediante un script suministrado por la empresa Keraunos y realizado por el investigador Diego Fernando del Río en su tesis de Doctorado ¹¹, logrando obtener una nueva base de datos de los rayos en Santander, la cual se redujo a un tercio del tamaño original al eliminar la multiplicidad de los strokes. Ubicando los datos procesados de la Red LINET, encerramos la superficie del departamento de Santander dentro de una cuadrícula donde cada recuadro tiene un área de 1km², según QGIS Santander tiene una extensión de 31.051 km². Se realizó el conteo de los rayos que inciden dentro de cada uno de estos recuadros con la opción contar puntos en polígonos de las herramientas de análisis de la pestaña vectorial del software, por motivos de la no visualización de los números dentro de cada uno de los pequeños recuadrados se le dio un color en una rampa de color espectral donde los valores van desde 0 hasta los 60 o 70 rayos dependiendo del año.

¹¹ (Río, 2018)

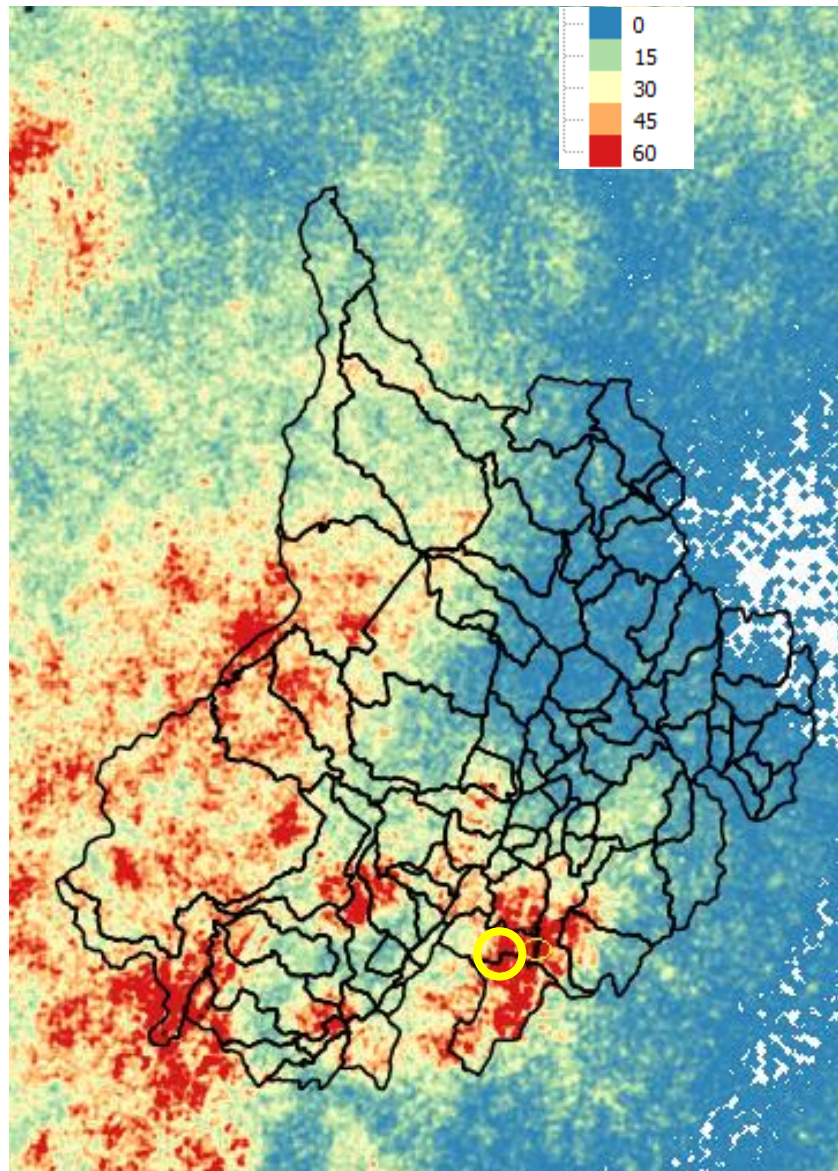


Figura 16. Densidad de Descargas a Tierra Santander 2014.
Fuente: Autor.

En 2014 la actividad eléctrica muestra 213298 rayos y 27336 km² en donde incide al menos un rayo en el departamento de Santander, más de 1008 km² tuvieron una DDT de entre 20 a 30 rayos al año, 97 km² tuvieron una DDT de entre 30 a 39 rayos al año, 9 km² tuvieron una DDT de entre 40 y 45 rayos al año. Dos ubicaciones especiales tuvieron la DDT más alta con 50 y 60 rayos al año, estas dos ubicaciones se encuentran entre el límite de los municipios de Suaita y

Charalá al sur del departamento, en la Figura 17 se alcanza a observar un pequeño círculo amarillo para facilitar la identificación de la zona.

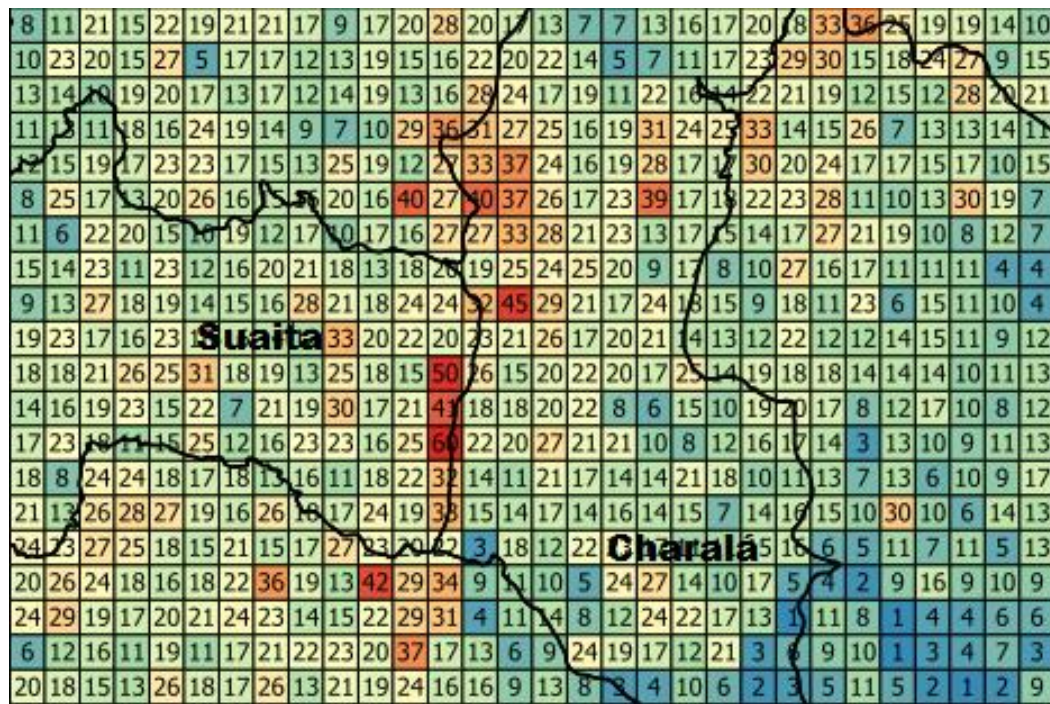


Figura 17. Ubicaciones con la mayor DDT 2014 Suaita y Charalá.
Fuente: Autor.

La figura 18 muestra las ubicaciones de mayor DDT del año 2014, esta imagen es la ampliación de la zona contenida dentro del círculo amarillo de la figura 17.

En 2015 la actividad eléctrica atmosférica generó dentro de Santander 311730 rayos y en un área de 28359 km² incidió al menos un rayo, la actividad de los flashes dejaron 98000 rayos y 1000 km² donde incidieron más rayos en comparación del año 2014. En este año se presentan 3798 km² con una DDT entre 20 a 29 rayos al año, 653 km² con una DDT entre 30 a 39 rayos al año, 67 km² con una DDT entre 40 y 49 rayos al año y 4 ubicaciones que tuvieron las DDT más

altas, los círculos amarillos en la Figura 19 demarcan las ubicaciones con la DDT más alta en el 2015.

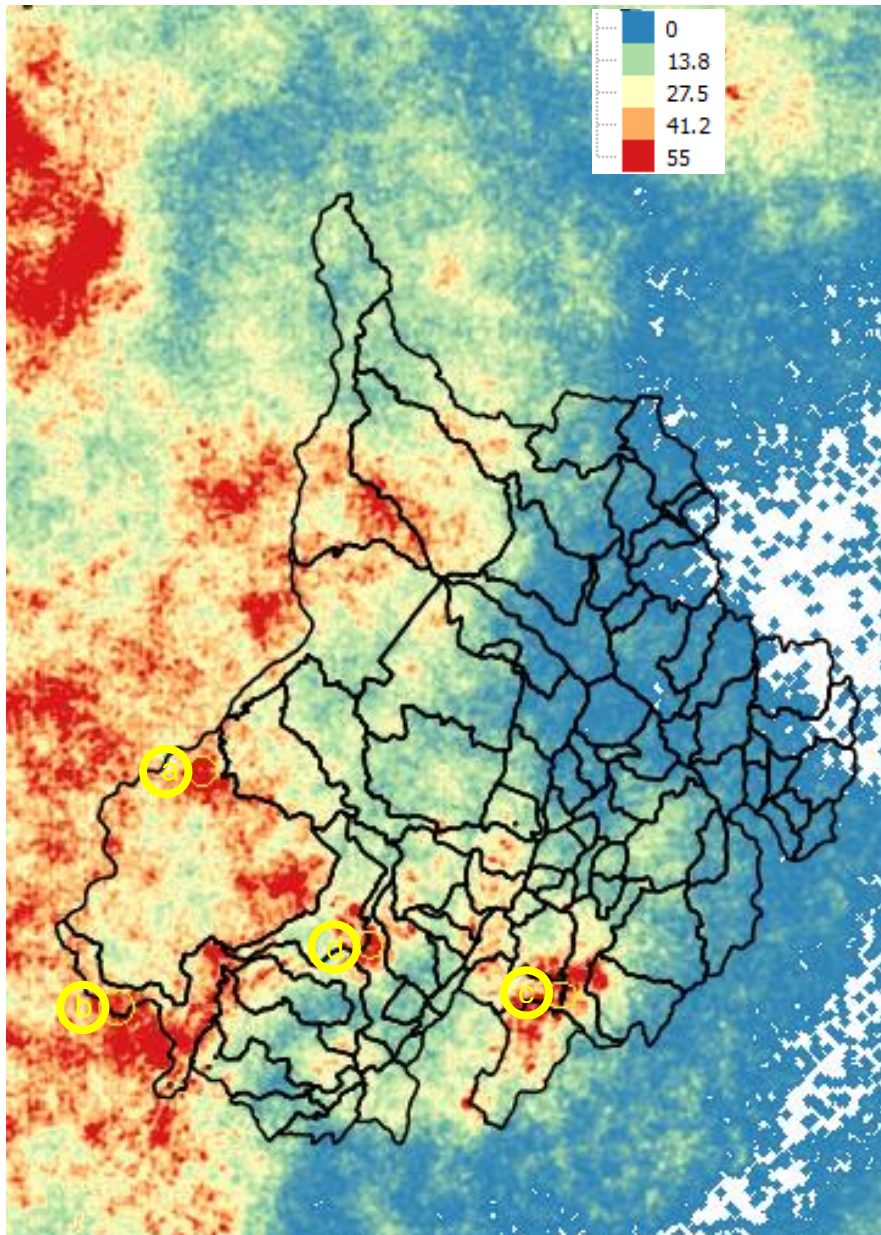
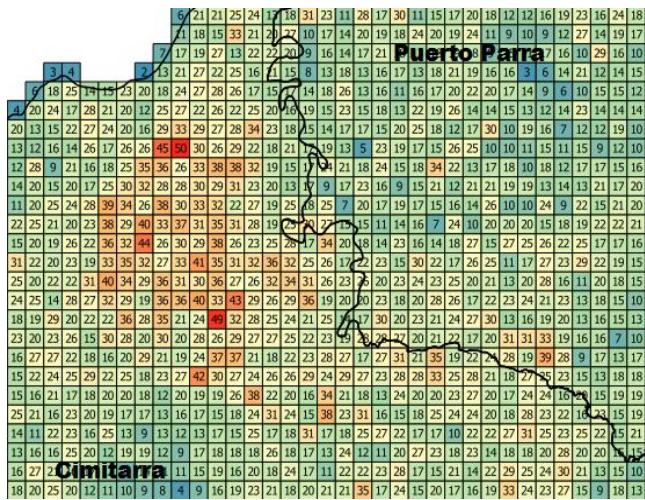


Figura 18. Densidad de Descargas a Tierra Santander 2015.

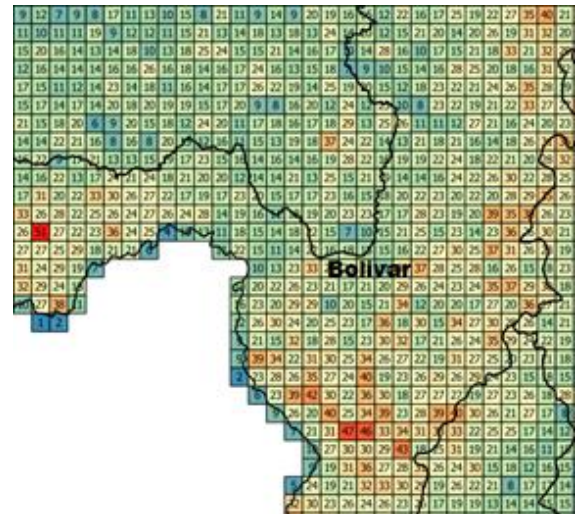
Fuente: Elaborada por el Autor.

La figura 20 amplía las 4 zonas con mayor DDT; la primera de ellas en la parte superior de Cimitarra con 50 rayos al año, la segunda en Bolívar con 51 rayos al año, la tercera ubicación en

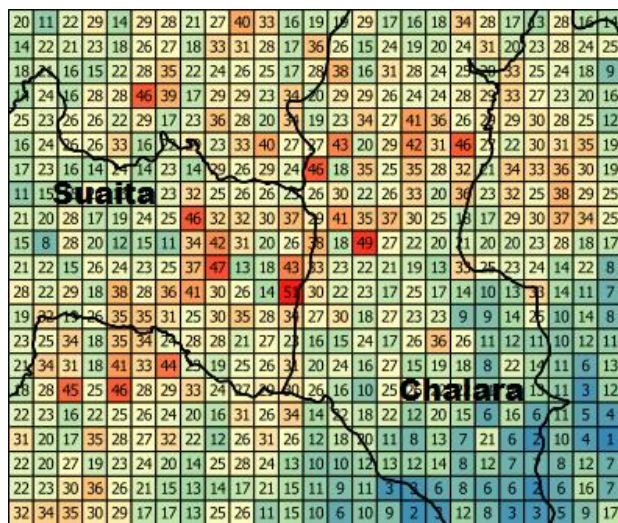
el límite de Suaita y Charalá con 51 rayo, y, por último, en el centro del municipio de Vélez, se presentó la mayor incidencia con una DDT de 56 rayos al año.



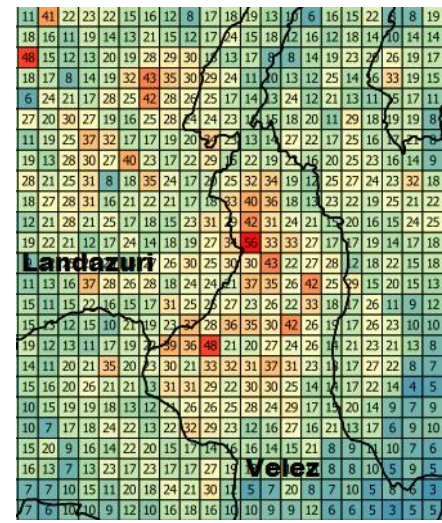
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 19. Ubicaciones con la mayor DDT 2015; Cimitarra (a) Bolívar (b) Suaita y Charalá (c) Vélez (d).

Fuente: Elaborada por el Autor.

En 2016 la actividad de rayos dejó como resultado unos 338133 rayos en el territorio santandereano, unos 28947 km² donde incidió al menos un rayo, 3926 ubicaciones con una DDT de entre 20 y 29 rayos al año, 879 ubicaciones con una DDT de entre 30 y 39 rayos al año, 175 ubicaciones con una DDT de entre 40 y 49 rayos al año, 21 ubicaciones con una DDT de entre 50 y 59 rayos al año y 4 km² que presentan la DDT más altas de este año, en la Figura 21 las ubicaciones se señalan con un círculo amarillo para facilitar la identificación.

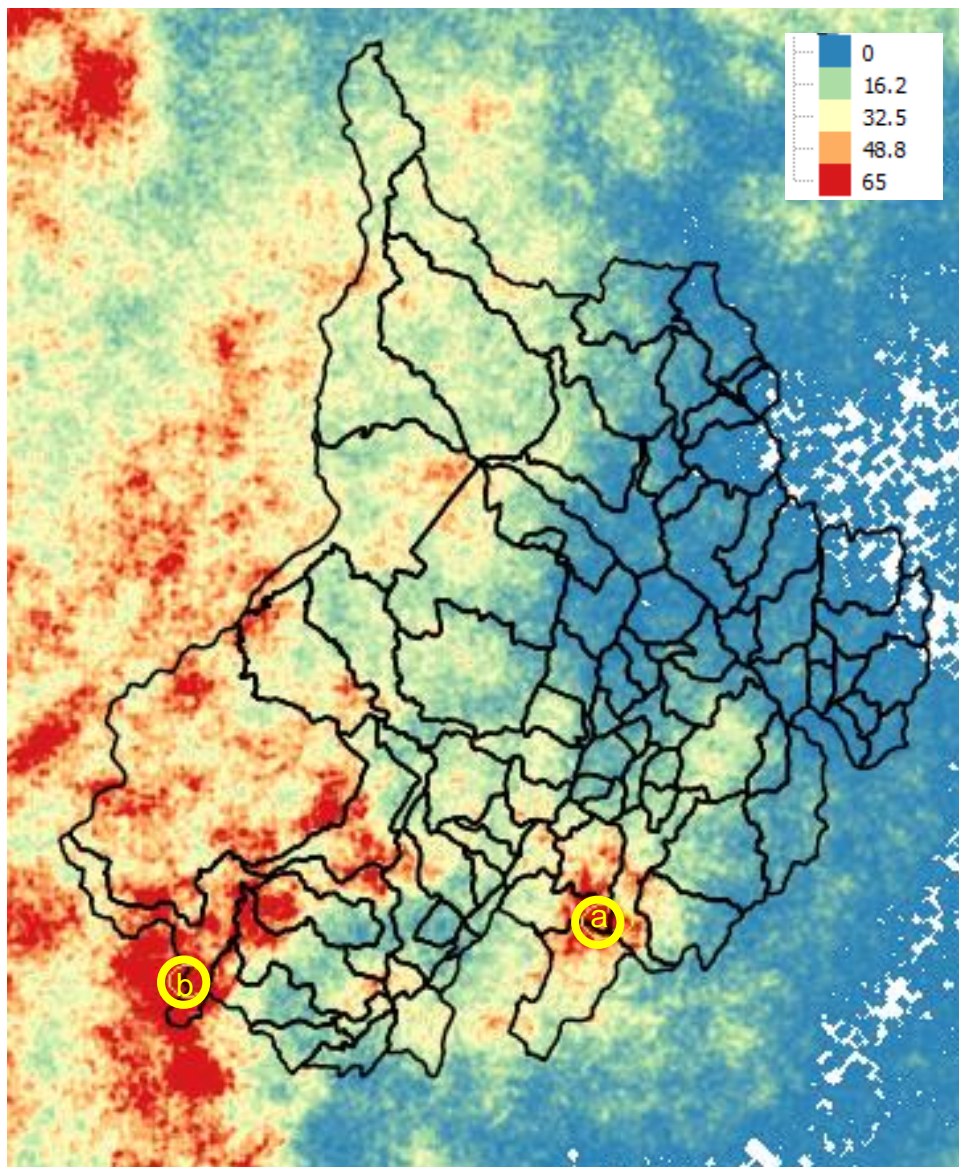
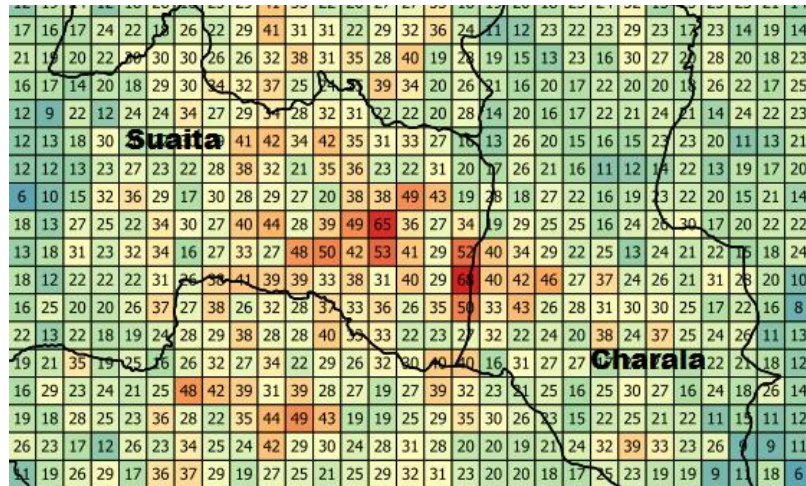


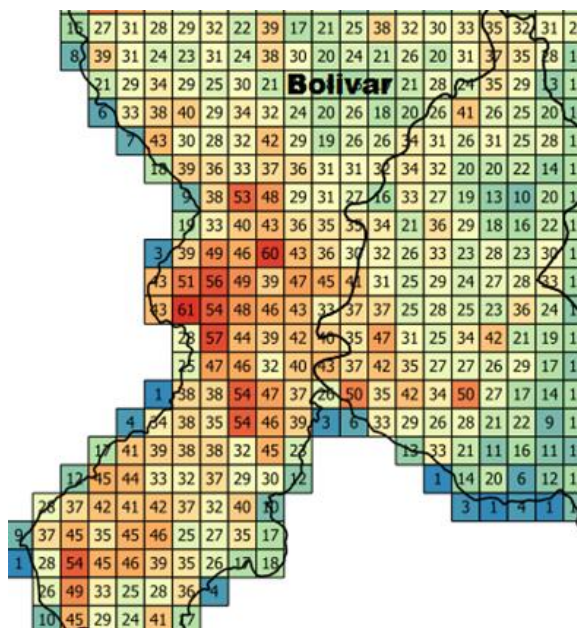
Figura 20. Densidad de Descargas a Tierra Santander 2016

Fuente: Elaborada por el Autor.

En la figura 22 se evidencian las 4 ubicaciones con la mayor Densidad de descargas a tierra del 2016 se encuentran en las dos secciones señaladas en la figura 19, la primera sección es en el municipio de Bolívar la cual presenta ubicaciones con 61, 60, 57, 56, 54 y 51 rayos al año, la segunda sección encierra nuevamente la zona entre Suaita y Charalá que presenta ubicaciones con 68, 52 y 50 rayos al año.



(a)



(b)

Figura 21. Ubicaciones con la mayor DDT 2015; Suaita y Charalá (a) Bolívar (b).
Fuente: Elaborada por el Autor.

En 2017 la actividad eléctrica atmosférica deja un registro de eventos con estos valores, 332916 rayos incidieron en Santander y 28781 km² donde al menos incidió un rayo en este año, más de 4000 km² con una DDT entre 20 y 29 rayos al año, 727 km con una DDT entre 30 y 39 rayos al año, 108 km con una DDT entre 40 y 49, 10 km con una DDT entre 50 y 59 rayos al año y 4 ubicaciones que tuvieron los valores más altos de DDT 64, 63, 61 y 70 rayos al año, como se muestran en la figura 23.

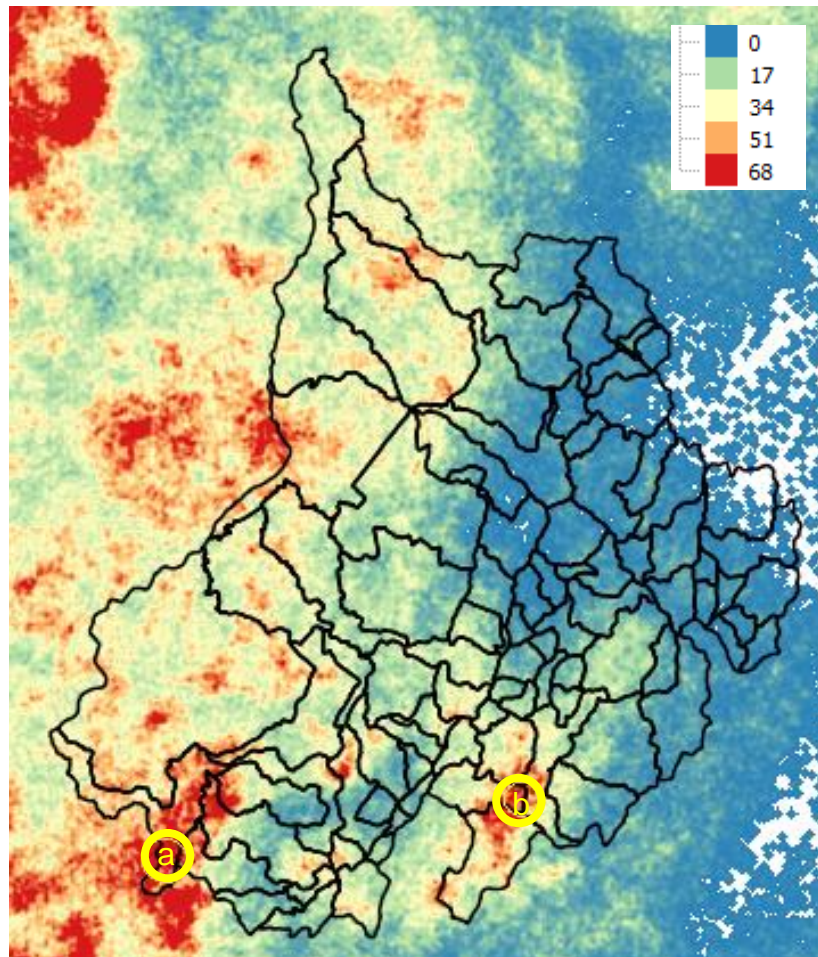
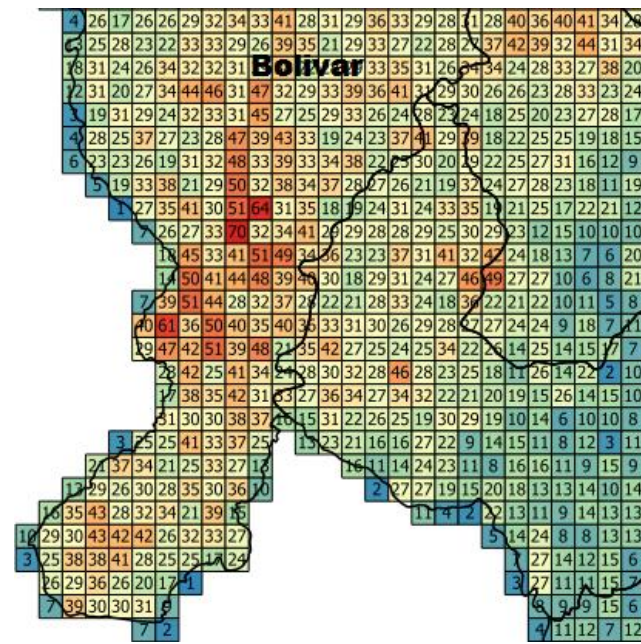
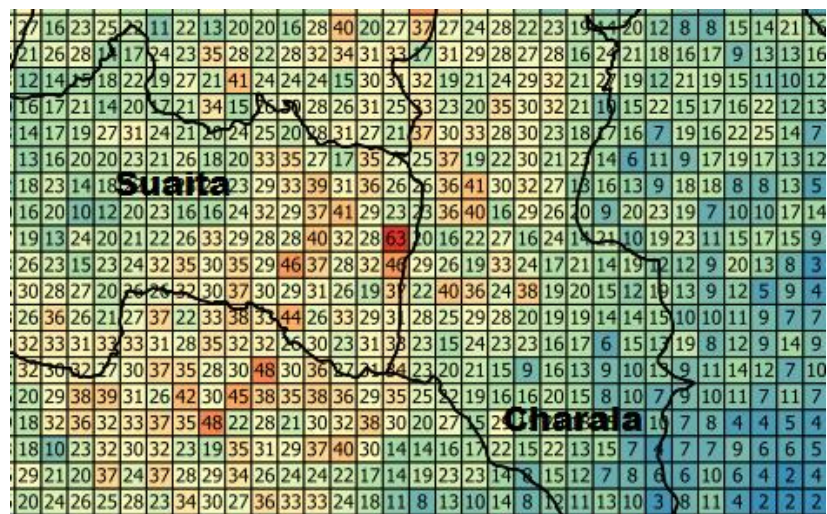


Figura 22. Densidad de Descargas a Tierra Santander 2017
Fuente: Elaborada por el Autor.

La figura 24 muestra las 4 ubicaciones que tienen la densidad de descargas a tierra más alta de 2017 son el límite de Suaita y Charalá como los años anteriores con un valor de 63 y Bolívar que en este año tuvo dos ubicaciones con grandes valores como 64 y 61 rayos al año y la ubicación de mayor valor de DDT registrado en los años de estudio con 70 rayos al año.



(a)



(b)

Figura 23. Ubicaciones con la mayor DDT 2017; Bolívar (a) Suaita y Charalá (b).
Fuente: Elaborada por el Autor.

En la figura 25 se ilustra el mapa de la Densidad de Descarga promedio en el departamento de Santander de los años 2014, 2015, 2016 y 2017. En promedio en el 90% del area santandereana incide al menos un rayo al año, en los cuatros años de estudio 1196077 rayos incidieron en el departamento de Santander, en los años 2014, 2015 , 2016 y 2017 se obtuvo como resultado un 18%, 26%, 28% y 28% respectivamente en la actividad de rayos.

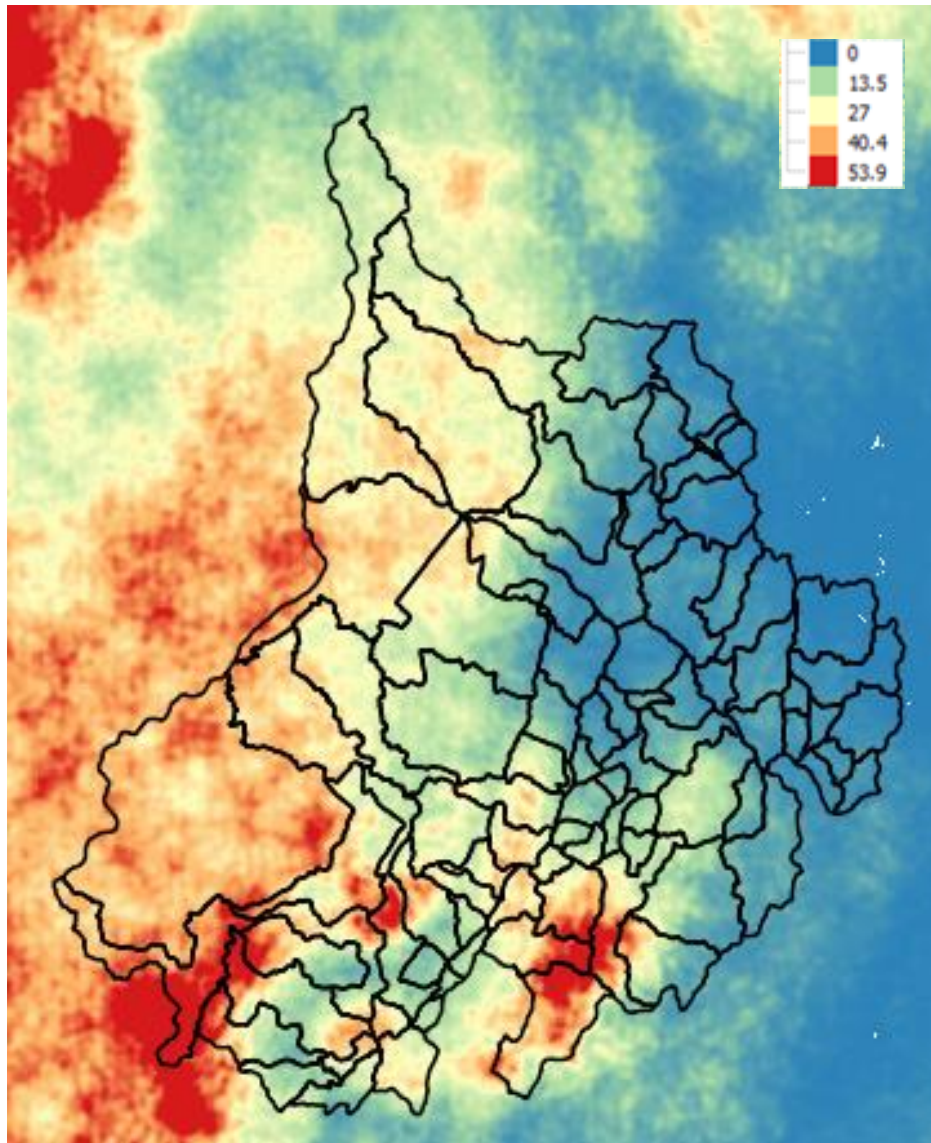


Figura 24. Mapa de la Densidad de Descargas a Tierra de los 4 años de estudio.

Fuente: Autor

7. Antena de captación

Unos de los objetivos específicos de este trabajo de grado es sugerir una ubicación para una antena de captación y medición de parámetros de rayos que permitirán seguir avanzando en la investigación de las descargas atmosféricas y sus parámetros en el departamento de Santander y sus zonas cercanas.

Las opciones más indicadas para la instalación de la antena serían donde la incidencia de rayos tuvo sus valores más destacados, zonas como el municipio de Bolívar, el municipio de Cimitarra, la región entre Suaita y Charalá, serían las ubicaciones más favorables por su gran actividad de rayos, sin embargo, para sugerir la ubicación final se deben tener en cuenta otros factores como el tiempo y transporte al lugar, la accesibilidad al sitio, una baja interferencia electromagnética, la seguridad de los elementos de medición, cobertura de internet, entre otras.

Los municipios cercanos a la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga con una actividad de rayos media o alta también serían buena opción. Estas características las cumple el municipio de Barrancabermeja por su cercanía, fácil acceso y baja interferencia electromagnética, además, se desarrollan otros proyectos de investigación. En la figura 26 se señala el área de estudio conformada en gran parte por el municipio de Barrancabermeja y unas pequeñas partes de los municipios de Simacota, San Vicente de Chucurí y Puerto Wilches. (área con límites: Margen inferior-izquierdo Latitud: $6^{\circ}90'N$, Longitud: $74^{\circ}16'O$; Margen superior-derecho Latitud: $7^{\circ}32'N$, Longitud: $73^{\circ}56'O$.)

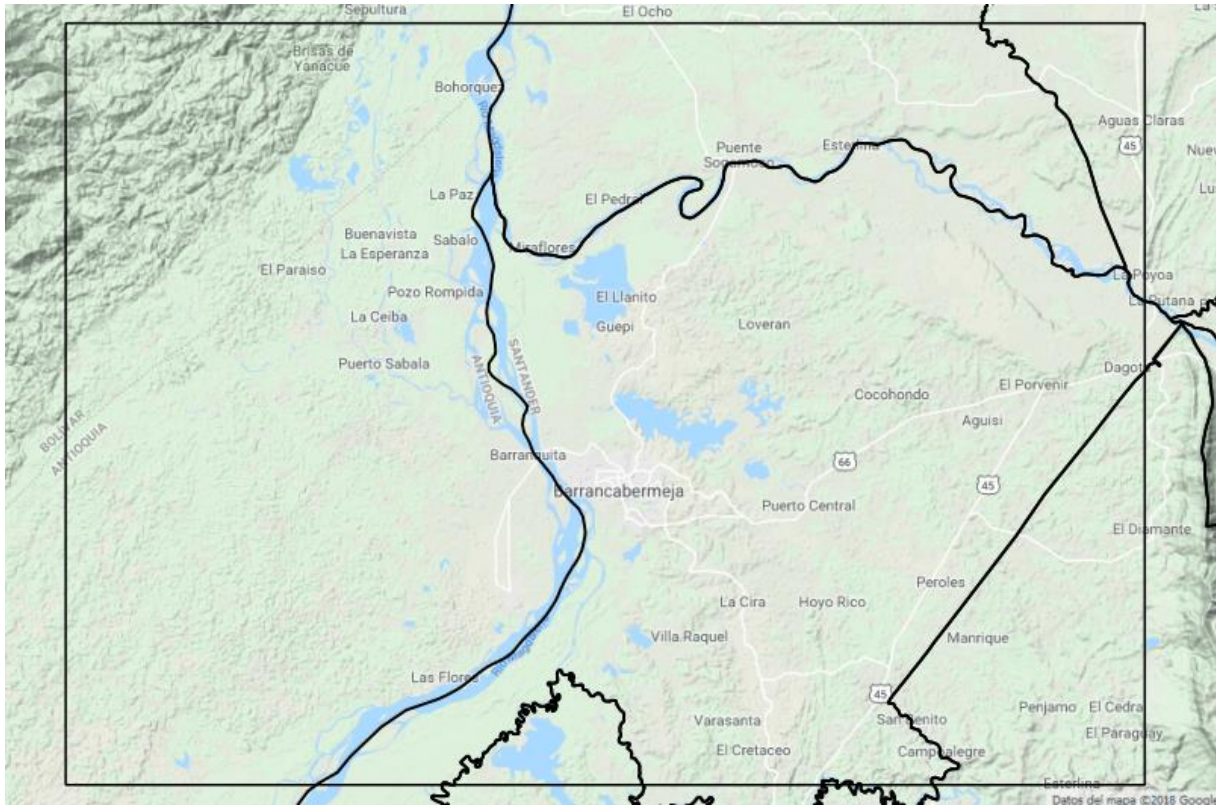


Figura 25. Recorte zona en estudio sugerida
Fuente: Autor

La zona en estudio tiene una extensión de 3149 km², a continuación, se presentarán los diferentes mapas de densidad de descargas de los años 2014, 2015, 2016 y 2017; analizándose cada uno por separado evidenciando la actividad de rayos en la zona.

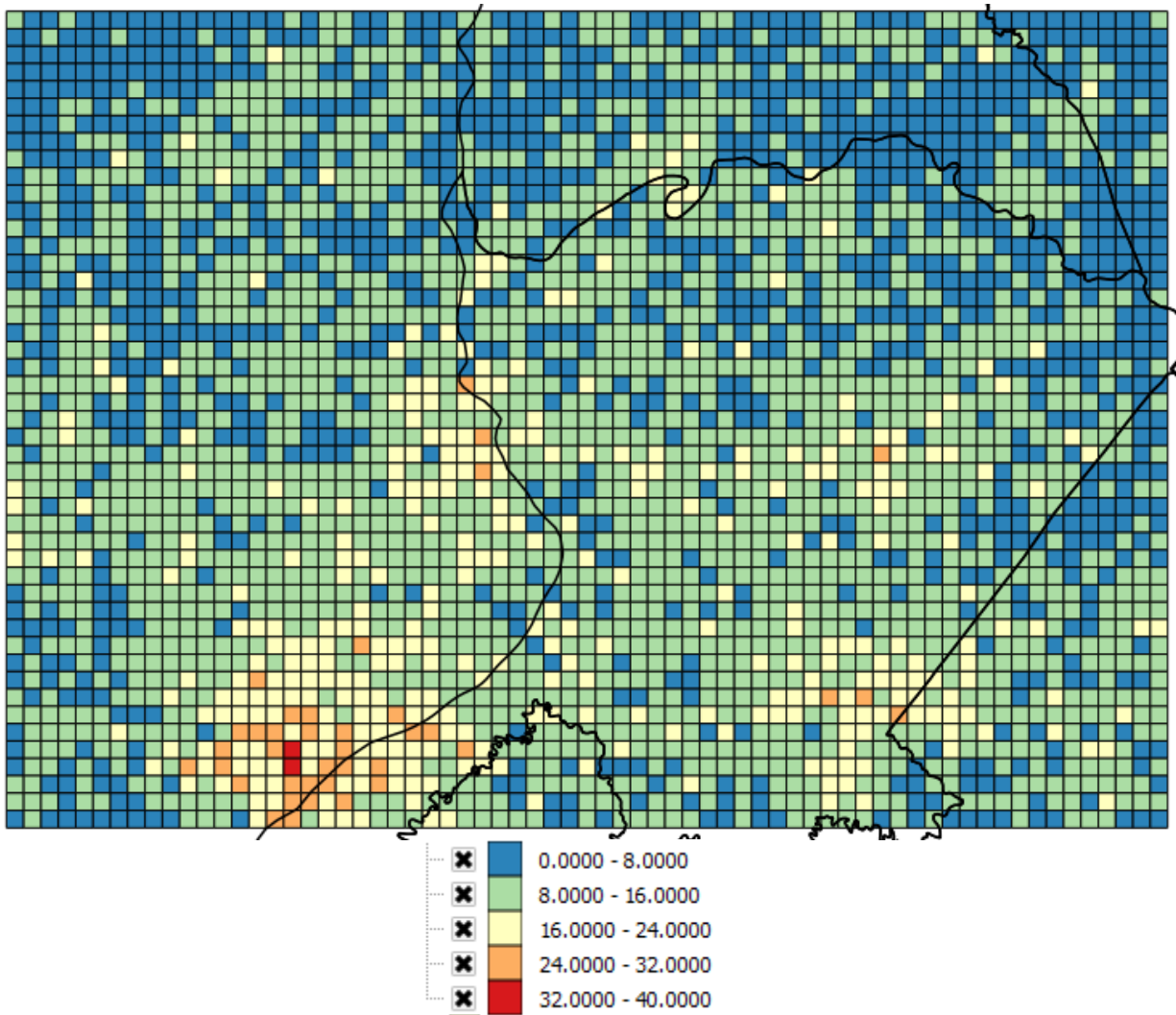


Figura 26. Mapa de la Densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2014.

Fuente: Autor

En el año 2014 se presentaron 34619 rayos en la zona de estudio, donde se halló una densidad de rayos por área de 11 rayos por km² en toda su extensión, con 1623 km² que tuvieron una DDT entre 10 y 19 rayos al año, 165 km² que tuvieron una DDT entre 20 y 29 rayos al año, 10 km² que tuvieron una DDT entre 30 y 39 rayos al año y una ubicación con una DDT de 40 rayos al año (figura 27).

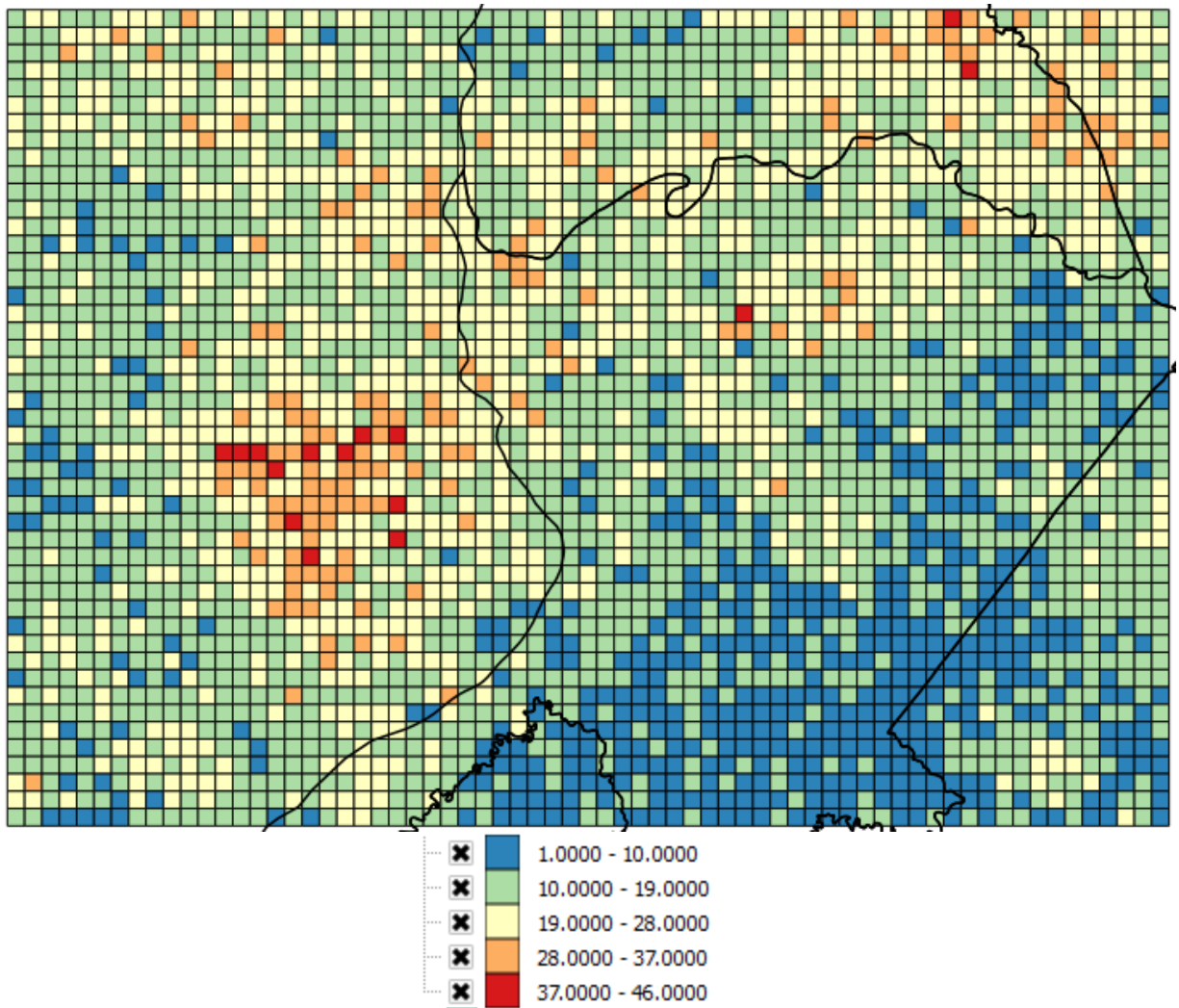


Figura 27. Mapa de la Densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2015.
Fuente: Autor

En el año 2015 se presentaron 54472 rayos en la zona de estudio, donde se halló una densidad de rayos por área de 17 rayos por km^2 en toda su extensión, con 2743 km^2 que tuvieron una DDT entre 10 y 19 rayos al año, 923 km^2 que tuvieron una DDT entre 20 y 29 rayos al año, 136 km^2 que tuvieron una DDT entre 30 y 39 rayos al año y 8 km^2 con una DDT de 40 rayos al año. (Figura 28)

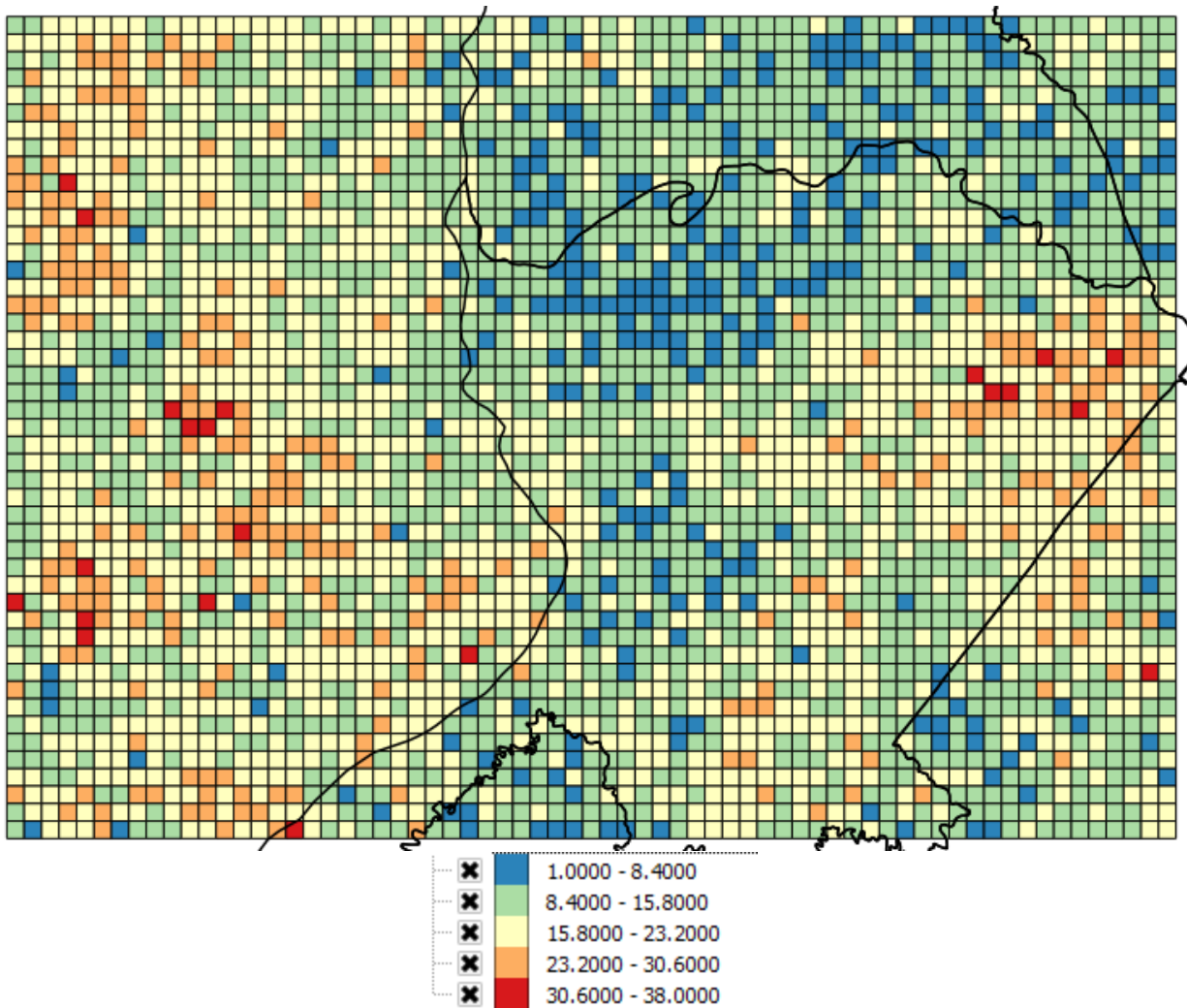


Figura 28. Mapa de la Densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2016.

Fuente: Autor

En el año 2016 se presentaron 49916 rayos en la zona de estudio, donde se halló una densidad de rayos por área de 16 rayos por km² en toda su extensión, con 1949 km² que tuvieron una DDT entre 10 y 19 rayos al año, 726 km² que tuvieron una DDT entre 20 y 29 rayos al año y 34 km² que tuvieron una DDT entre 30 y 39 rayos al año. (Figura 29)

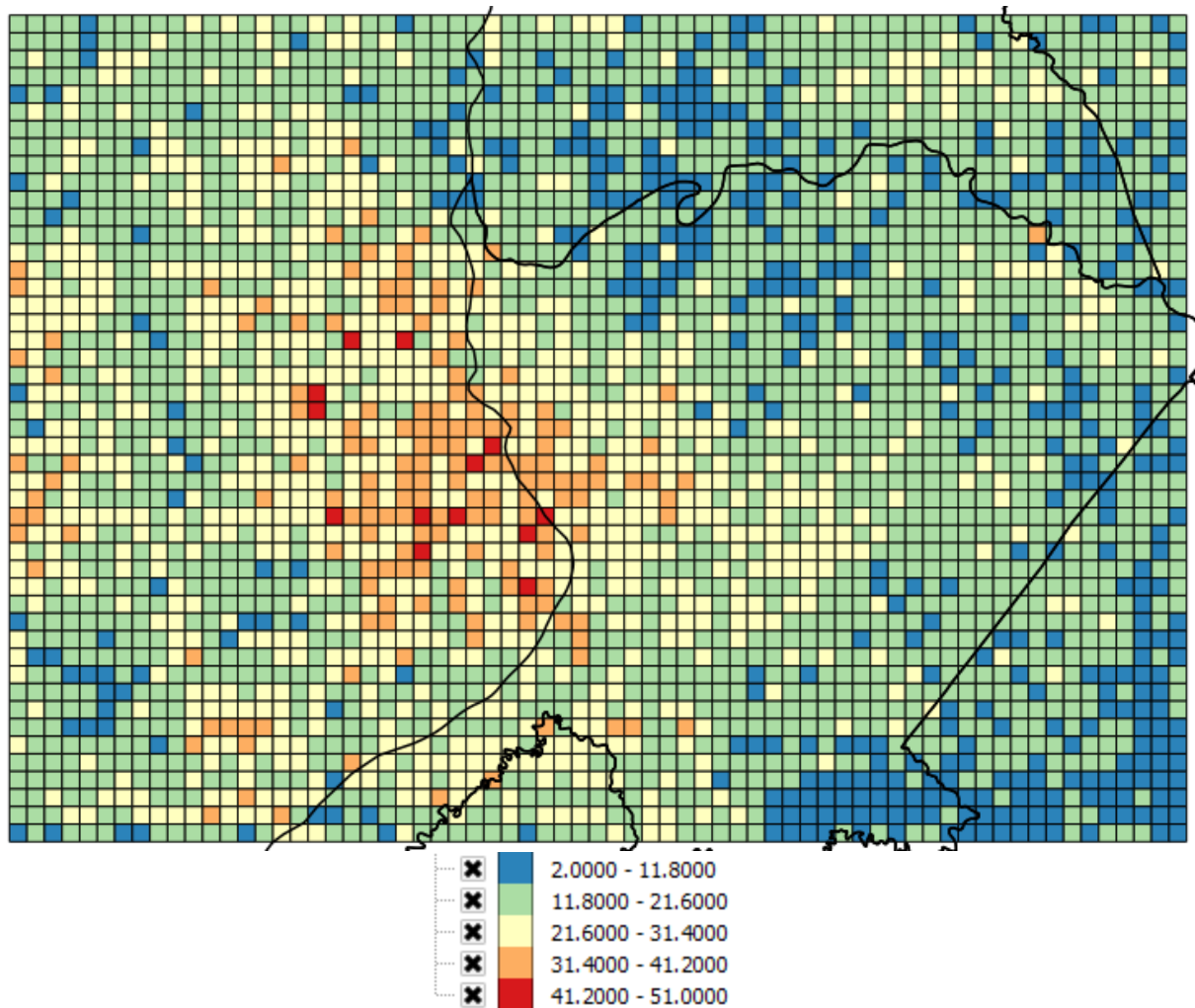


Figura 29. Mapa de la Densidad de descargas en la zona sugerida en el año 2017.
Fuente: Autor

En el año 2017 se presentaron 60545 rayos en la zona de estudio, donde se halló una densidad de rayos por área de 19 rayos por km^2 en toda su extensión, con 1631 km^2 que tuvieron una DDT entre 10 y 19 rayos al año, 1028 km^2 que tuvieron una DDT entre 20 y 29 rayos al año, 258 km^2 que tuvieron una DDT entre 30 y 39 rayos al año, 20 km^2 con una DDT entre 40 y 49 rayos al año y 2 ubicaciones con DDT de 50 y 51 rayos al año. (Figura 30).

Los mapas de los años 2014, 2015, 2016 y 2017 muestran la gran actividad eléctrica que existe en esta zona, teniendo en general densidades por su extensión de 11, 17, 16 y 19 rayos por

año respectivamente, indicando que más de la mitad de su extensión tiene una incidencia de rayo de 10 rayos por km² y en tres de los cuatro años se presentaron al menos un rayo en toda su área.

En la figura 31 se muestra el mapa de densidad de descargas promedio de los años 2014, 2015, 2016 y 2017, señalando en el recuadro amarillo la zona sugerida para la instalación de la antena de medición. Durante los 4 años de la investigación incidieron en esta zona 199552 rayos, obtenido 18% en el año 2014, 27% en el año 2015, 25% en el año 2016 y 30% en el año 2017. Se marca con un recuadro amarillo donde la actividad eléctrica es mayor.

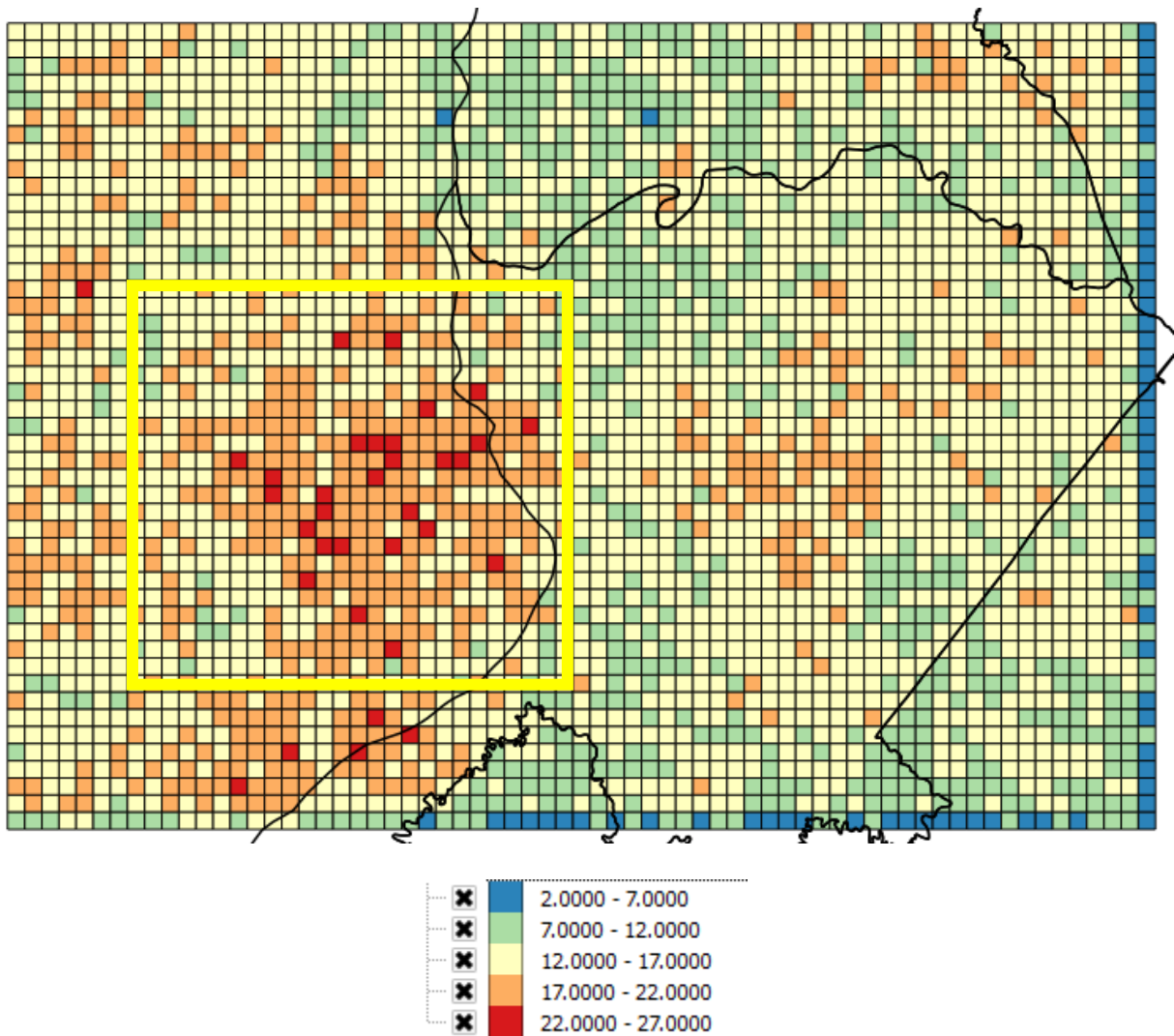


Figura 30. Mapa de la Densidad de descargas promedio de la zona sugerida.

Fuente: Autor

En la figura 32 se puede observar la zona sugerida encerrada en el recuadro amarillo de la figura 31, para una mejor visualización, se evidencian valores de densidad de descargas promedio de entre 16 y 26 rayos al año promedio de los años 2014, 2015, 2016 y 2017.

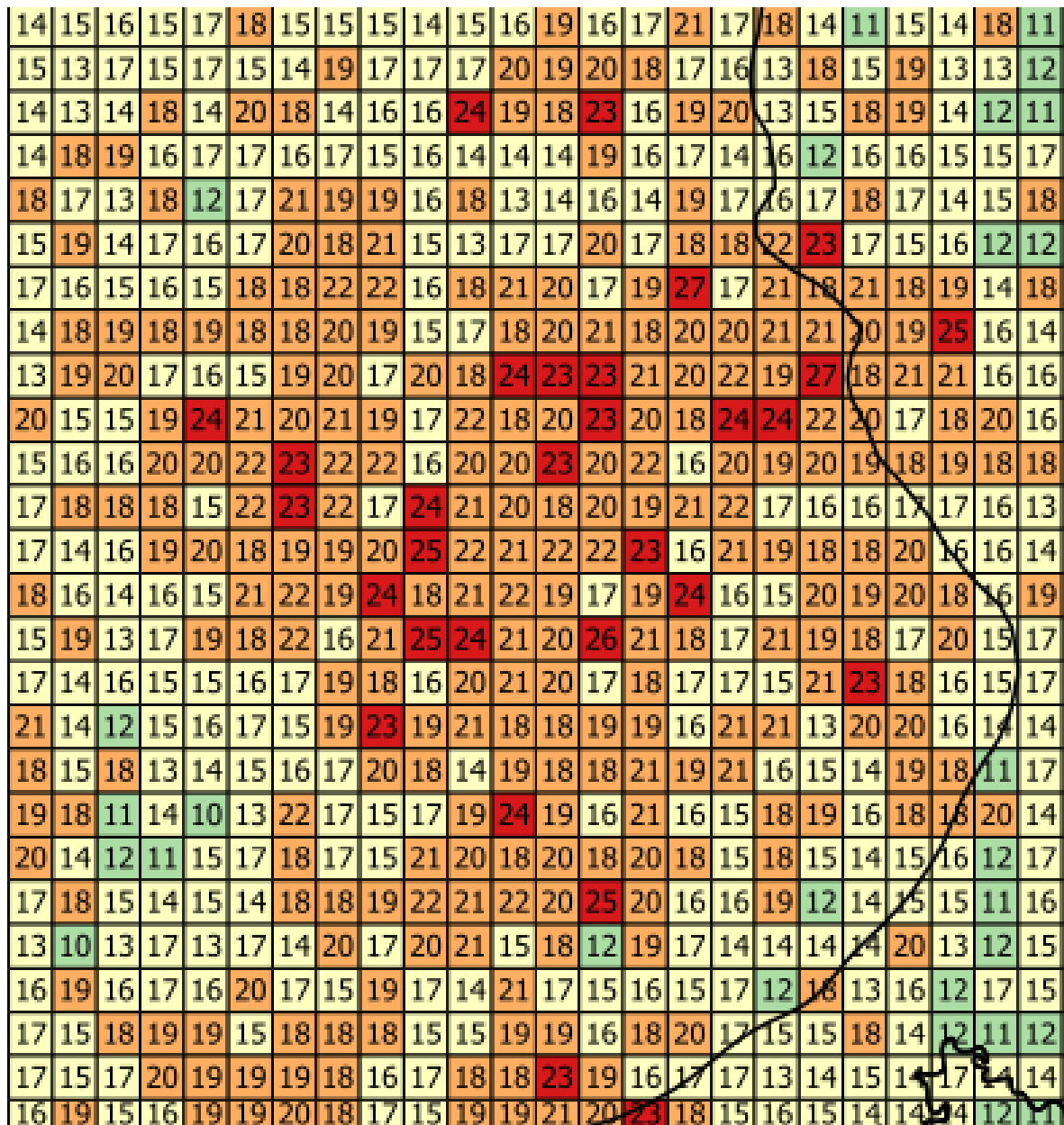


Figura 31. Mapa DDT promedio de la zona sugerida.

Fuente: Autor

8. Conclusiones

1. Se evidenció que las zonas en Santander en donde hay una gran actividad de rayos tienden a repetirse. Cada año trae nuevos valores de Densidad de Descargas a Tierra a lo largo del departamento, pero siguen siendo estas ubicaciones donde se presentan los epicentros de los grandes eventos de descargas atmosféricas en la región santandereana.
2. La contribución de la actividad eléctrica de la zona del Magdalena Medio se destaca en los mapas de la DDT de los años en estudio del departamento de Santander, municipios como Cimitarra, Landázuri, Puerto Parra, Barrancabermeja, Sabana de torres, Puerto Wilches, Bolívar y Vélez, están siendo representados en colores cálidos en la mayoría de sus áreas, siendo resultado de una media o alta actividad eléctrica atmosférica. Llegando a la conclusión que los métodos de conteo de flashes y strokes concuerdan en la actividad de rayos del departamento de Santander.
3. Comparando los métodos de conteo que se utilizaron en el proyecto, se obtiene que el método de strokes permitió hacer análisis temporales y espaciales importantes para caracterizar la actividad de rayos en Santander, mientras que en el método de los flashes el conteo de la densidad de descargas a tierra es más acertado debido a que representa realmente la incidencia de rayos.
4. En el análisis de los datos de los años 2014, 2015, 2016 y 2017, el departamento de Santander demostró una gran actividad de rayos y los valores encontrados del parámetro de la Densidad de Descargas a Tierra en el departamento de Santander son superiores a los esperados con respecto a los presentados en las zonas templadas.

5. La única ubicación constante que apareció durante los 4 años demostrando una gran densidad de descargas fue el límite entre Suaita y Charalá, donde en 2014 presento la DDT más alta con un valor de 60 rayos*km², en 2015 presento una DDT de 51 rayos*km², en 2016 presentó nuevamente el valor más alto de DDT con 68 rayos*km² y por último en el 2017 presentó una DDT de 63 rayos*km², se concluye que esta sería la zona con mayor actividad eléctrica del territorio santandereano.
6. Para la ubicación de la antena se recomienda la zona mostrada en la figura 32 debido a las facilidades de las condiciones como su buena actividad de rayos, la accesibilidad al sitio, la baja interferencia electromagnética y la seguridad de los elementos de medición.

Referencias Bibliográficas

- Aponte, G. (07 de 2009). *Protección de Edificaciones*. Recuperado el 18 de 10 de 2018, de http://www.geiico.com.co/geiico/Publica/Upload/Publico//3_parte_1_rayo.pdf
- Ballesterismo. (22 de 09 de 2011). *¿Cómo se cuentan los rayos caídos en un determinado lugar?* Recuperado el 18 de 10 de 2018, de <http://www.ballesterismo.com/2011/09/como-se-cuenta-los-rayos-caidos-en-un.html>
- Cardona, S. N. (25 de 08 de 2016). *Los rayos son fundamentales para la protección humana de la peligrosa radiación ultravioleta*. Recuperado el 18 de 10 de 2018, de <https://www.elespectador.com/noticias/ciencia/los-rayos-son-fundamentales-proteccion-humana-de-peligr-articulo-651209>
- Cruz, A., Torres, H., Aranguen, D., & Inampues, C. (s.f.). *Rysh analisys of death by lightnings in colombia for the period 1997 - 2014*.
- Keraunos. (2015). *Red colombiana de deteccion total de rayos - LINET*.
- Pareja, D. J. (18 de 22 de 2018). *La 'maldición' de Cáceres, el pueblo donde más rayos caen en Colombia*. Recuperado el 18 de 10 de 2018, de <http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/el-pueblo-colombiano-donde-mas-rayos-caen-115572>
- Rio, D. F. (2018). *Evaluacion del efecto urbano sobre los parametros del rayo. Caso Colombiano*. Doctorado UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES.
- Torres, H., & Avila, D. (2000). *Hipótesis de investigación sobre variación espacial y temporal en los parametros del rayo*.
- VanguardiaLiberal. (2009). *Cambiaría organización de las Provincias de Santander*. Recuperado el 18 de 10 de 2018, de <http://www.vanguardia.com/actualidad/politica/256086-cambiaría-organización-de-las-provincias-de-santander>.
- Younes, C. (2002). *Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia*. Tesis de Maestría, Universidad nacional de Colombia.

