

Implementación de un software para análisis de riesgo, según la norma NTC 4552-2 a partir de datos experimentales de la densidad de descargas a tierra

Sergio Andrés Estrada-Vélez¹

Trabajo de Grado Presentado como Requisito Parcial para el Título de:
Ingeniero Electricista

Asesores:

Ing. Joseph Sosapanta Salas, MBA

Ing. Carlos David Zuluaga Ríos, PhD

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Eléctrica

Mayo 2022

¹ Sergio Andrés Estrada-Vélez <https://orcid.org/0000-0001-6081-8355>

Cualquier información correspondiente a este escrito por favor dirigirse a los correos electrónicos: sestrada@pascualbravo.edu.co y sergio.estrada1@udea.edu.co

Resumen

En este documento se presenta el desarrollo del software Charlightning, el cual evalúa el nivel de riesgo presente en una edificación de uso final debido a una descarga eléctrica atmosférica con base a la norma NTC 4552. Este software tiene la característica de ser una herramienta de libre acceso, multiplataforma, código abierto y escrito en el lenguaje de programación Python.

Adicionalmente, el software dispone de la variable densidad de descarga a tierra (DDT), con los datos tomados de la NASA, del satélite TRMM LIS. Dicha variable al ser fundamental en el cálculo se presenta de manera directa, actualizada y en forma global (entre las coordenadas N: 38, S: -38, W: -180, E: 180).

Palabras clave: Densidad de descarga a tierra, DDT, interfaz de diseño, NTC 4552, protección contra descargas eléctrica y atmosféricas, rayos.

Abstract

This document shows the development of the Charlightnint software, which based on the NTC 4552 policy, evaluates the risk level in a final use building due to an atmospheric electrical discharge. The software has the features of being a tool of free access, multiplatform, open source and written on Python. Additionally, the software has the ground flashes density variable (GFD), with data taken from the TRMM LIS NASA satellite. At this variable being fundamental at calculation, is presented in a direct, updated and global way (between N: 38, S: -38, W: -180, E: 180 coordinates).

Keywords

Ground discharge density, DDT, design interface, NTC 4552, protection against electric and atmospheric discharge, lightning.

Tabla de Contenido

1.	Planteamiento del problema	11
2.	Justificación	13
3.	Objetivos.....	15
1.1	Objetivo general	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
4.	Marco teórico.....	16
3.1	El rayo y el mapeo de rayos	16
3.2	Tesis sobre software análisis de riesgo	16
3.3	Estudios sobre metodología de análisis de riesgo y DDT.....	16
3.3.1	Evaluación del riesgo por rayos para Colombia por Audrey Soley Cruz Bernal	16
3.3.2	Importancia del sondeo de datos en la Densidad de Descargas Atmosféricas a tierra; Aplicación del lenguaje lógica difusa en evaluación de riesgos de impacto de rayo en el valle de Matatipac	17
3.4	Referente a la DDT para cálculos en la NTC 4552-2	17
3.5	DDT de diferentes fuentes para Medellín	22
3.6	Formas de hallar DDT según NTC 4552-2	22
3.7	Geolocalizadores de rayos global.....	22
3.7.1	Redes de localización de rayos mundial:	22
3.7.2	Detección de rayos satelital	23
3.8	Geo localizadores de rayos en Colombia	24
3.8.1	Sistema de Información de Descargas – SID:	24
3.8.2	Keraunos S.A.S:	24
3.9	Software Mitigación y Control de Riesgo - Análisis de Riesgos en Colombia.	25
3.9.1	Ciprotec	25
4	Metodología.....	26

4.1	Tipo de proyecto.....	26
4.2	Método	26
5	Resultados del proyecto.....	27
5.1	Formas de determinar DDT mediante NTC 4552-2.....	27
5.1.1	Ejemplo 1 por medio Ecuación (2) y refiriéndonos al mapa Figura 1	27
5.1.2	Ejemplo 2 por medio de mapa Figura 2	27
5.1.3	Ejemplo 3 tomando la Tabla 4	27
5.2	Procedimiento para determinar la DDT en el software Charlightning.....	28
5.2.1	Comparación de los datos DDT frente a NTC 4552-2	30
5.3	Características del software.....	30
5.3.1	Interfaz Gráfica	32
5.3.2	Informe de Cálculos	33
5.4	Comparación resultados software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator.	36
6	Conclusiones.....	40
7	Recomendaciones	41
8	Referencias bibliográficas	43
9	Anexos	47
	Informe del cálculo de riesgo	47

Lista de tablas

Tabla 1. Factor de la localización Cd.....	18
Tabla 2. Actividad de rayos en la geografía colombiana entre 1977 - 1999. Área = 1393 * 900 km2.....	19
Tabla 3. DDT para algunas ciudades de Colombia.....	20
Tabla 4. DDT para Medellín (rayos/km2 año).....	22
Tabla 5. Comparación de la DDT para algunas ciudades de Colombia entre NTC 4552-1 y software Charlightning.....	31
Tabla 6. Parámetros software Charlightning que puede cambiar libremente	32
Tabla 7. Parámetros software Charlightning presentan un límite al ser cambiado por el usuario .	32
Tabla 8. Parámetros software Charlightning que no pueden ser cambiado por el usuario	33
Tabla 9. Casos comparación Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator.	37
Tabla 10. Resultado comparativo software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 1.....	38
Tabla 11. Resultado comparativo software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 2.....	38
Tabla 12. Resultados comparativos software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 3.....	39

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de ISO-Nivel cerámico para Colombia (Área de 30 km ² x 30km ²) –	22
Figura 2 DDT Colombia 1999 (Área 300 km ² * 300 km ²)	24
Figura 3 Mapa de descargas en tiempo real	25
Figura 4. Esquema funcionamiento algoritmo variable DDT	29
Figura 5. Mapa de DDT del departamento de Antioquia	30
Figura 6. Ventana inicial software Charlightning	35
Figura 7. Ventana principal software Charlightning dimensiones de la estructura e influencia ambiental	36
Figura 8. Ventana principal software Charlightning líneas que llegan y medidas de protección	36
Figura 9. Ventana principal software Charlightning el tipo de pérdidas de la estructura	37
Figura 10. Ventana principal software Charlightning cálculo DDT	37

Glosario

Ad: Variable que toma la NTC 4552-2 y da cuenta de la localización relativa del objeto a ser protegido

DDT: Densidad de Descargas a Tierra.

Estructura a ser protegida: Según la 4552-2 estructura para la cual se requiere protección contra efectos del rayo.

Flash: “Una o varias descargas que, sumadas en el cual las descargas se agrupan en un flash si cumplen con los siguientes criterios: a) tienen puntos de impacto dentro de un radio de 10 km de la primera descarga, y b) no hay más de 500 ms de tiempo entre las descargas. La duración máxima de un flash es de 1 segundo y la multiplicidad máxima permitida es de 15.” (Younes-Velosa, 2020)

Nd: Variable de la NTC 4552-Estimación del promedio anual de descargas sobre la estructura

LIS: Sensor de imágenes de rayos

Stroke: Parte del rayo que corresponde a un impulso de corriente. Esta corriente tiene un tiempo medio T2 comúnmente menor a 2 ms.

OTD: Detector óptico de transitorios

Introducción

Según (Torres-Sánchez, 2010), Colombia se encuentra en una de las zonas donde se presenta una de las mayores frecuencias de descargas atmosféricas (rayos) del mundo. Una mayor comprensión de este fenómeno permite tomar decisiones más informadas relacionadas con el clima, también a su vez trazar conexiones entre descargas eléctricas y distintos fenómenos climáticos. Por otra parte, la norma NTC 4552-2 recomienda los conceptos técnicos sobre la evaluación del riesgo contra descargas eléctricas atmosféricas en Colombia. Aunque existen diferentes tipos de descargas eléctricas atmosféricas, la norma NTC 4552-2 toma en cuenta para sus cálculos, las descargas descendentes de polaridad negativa la cual se conoce como Densidad de Descargas a Tierra (DDT), ya que las medidas realizadas por medios empíricos han mostrado que este tipo de descarga presenta los mayores picos de corriente y a su vez mayor porcentaje de ocurrencia (Icontec, 2008a).

La DDT, es un parámetro que se utiliza como base para cuantificar las pérdidas humanas, animal y económicas en la NTC 4552-2; pero que a su vez presenta una de las mayores dificultades para determinarlos debido a que depende de condiciones climáticas (Torres et al., 2015, p. 4090). Este trabajo presenta una forma de estimar la DDT por medio de los datos satelitales sobre descargas atmosféricas a nivel mundial, en donde se da un valor de DDT para el trópico.

Este trabajo da respuesta a la pregunta de ¿Cómo manejar los datos satelitales que se tienen de DDT en Colombia, para aplicarlos en un software de evaluación del riesgo según la NTC 4552-2?

Acto seguido se presenta un software donde se puede realizar el cálculo de la evaluación del riesgo contra descargas eléctricas atmosféricas, según la norma NTC 4552-2, teniendo en cuenta la filosofía y el diseño del software IEC Risk Assessment Calculator que está basado en la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC 62305) en la cual se soporta la norma NTC 4552-2, con modificaciones y adecuaciones de la norma para Colombia.

En capítulo 4 se presenta el marco teórico, da cuenta de software que se han desarrollado sobre la norma NTC 4552-2 y los referentes que presenta dicha norma para hallar la DDT; también muestra algunos valores tomados de diferentes fuentes sobre DDT en el valle de Aburrá; da un repaso de distintas redes de localización instaladas en Colombia, al igual de la recolección de datos de rayos satelitales.

El capítulo 5 presenta el método de la investigación realizado es de tipo aplicado en donde se utilizarán datos medibles que se acerca a una investigación cuantitativa.

En el capítulo 6 se presenta los resultados que muestran donde se presenta el software Charlightning, de código abierto, al igual muestra una forma para hallar la DDT por medio de datos satelitales, incorporados en el programa de cómputo.

1. Planteamiento del problema

El rayo es un fenómeno climático que está asociado a la atmosfera de la tierra, vario espacio temporalmente dependiendo de las condiciones locales donde se presenta, con respecto a Colombia este se encuentra en una de las zonas donde mayor frecuencia de descargas atmosféricas (rayos) caen en el mundo. Al ser un fenómeno físico, es estudiado por diferentes ramas científicas, ya que la comprensión de regularidades de este, permite tomar decisiones más informadas relacionadas con el clima, también a su vez trazar conexiones entre descargas eléctricas y distintos fenómenos climáticos (Torres-Sánchez, 2010). También es importante resaltar que los rayos pueden estar asociados a la temperatura del aire (Trujillo Del Río, 2018) en donde toma relevancia el estudio y comportamiento frente a un escenario de calentamiento global.

Para el control de descargas atmosféricas no existe en la actualidad medios tecnológicos que puedan evitarlos, pero si se pueden tomar medidas para mitigar sus efectos (Icontec, 2008a). Por otro lado, se estima que el número actual de personas muertas por año es de aproximadamente 4.000 a 5.000, cifra que puede ser significativamente mayor ya que no se tienen datos de todos los países del mundo; con respecto a Colombia, se encuentra entre los países que tiene tasas de 5 a 6 muertes por millón, se ha comprobado que tomar medidas para conducir las descargas atmosféricas a tierra o utilizar equipos limitadores del rayo, ayudan a prevenir lesiones de las personas al igual que protege las instalaciones eléctricas, por ejemplo, en EE. UU en el siglo pasado se tenía un 25 % de muertes en el interior de las estructuras, debido a la falta de protección que brindaba caminos a seguir para las descargas atmosféricas a través del cableado, la plomería o elementos estructurales de las casas y los edificios, donde esa tasa hoy en día es casi “inexistente” (Holle, Cooper, & Managing, 2019).

Es por este motivo que diferentes países han tomado medidas para una adecuada protección contra descargas de origen eléctrico, incluyendo en importancia las descargas atmosféricas (Rayos), en Colombia el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC implementó un conjunto de normas denominadas NTC 4552 para este fin. donde se puede notar la importancia que presenta el tomar medidas necesarias para mitigar los efectos causados por los rayos.

En la metodología que utiliza la NTC 4552-2 se puede ver que el nivel de riesgo depende tanto de las características de la estructura: material, área efectiva; el tipo de servicio que está presta: cantidad de personas que este puede albergar; y se relaciona por medio de la ubicación con la DDT ya que si las variables mencionadas de la estructura y tipo de servicio siguen constantes, pero la ubicación de esta cambia, puede presentar un mayor o menor riesgo ya que puede variar la DDT. Es por este motivo que la DDT toma relativa significación y al tener una mejor comprensión de este fenómeno, ayuda a una mayor precisión en la aplicación de la evaluación de riesgo en la norma NTC 4552-2.

¿Cómo manejar los datos satelitales que se tienen de densidad de descargas atmosféricas en Colombia, para aplicarlos en un software de evaluación del riesgo según la NTC 4552-2, en el Valle de Aburrá?

2. Justificación

En el análisis empírico que hace la norma NTC 4552-2 se puede ver que existe un ítem para valorar el riesgo, que radica en la probabilidad de que una descarga impacte de manera directa o cerca de la estructura, para determinar cuáles medidas son necesarias en la protección de esta, se realiza un cálculo según la estimación del promedio anual de descargas sobre la estructura (Nd) el cual depende del área a proteger de la estructura, la influencia de la localización relativa del objeto a ser protegido (Ad) y la DDT ; esta última reviste una vital importancia pero “es de difícil selección, debido a diversos factores, como son la actualidad y precisión de los mapas, la definición, la resolución obtenida y el criterio del evaluador.” (Enrique & Castillo Anaya, 2019, p. 19). Con el objeto operar unos datos que determinan la Este trabajo plantea un modelo alternativo mediante los datos abiertos suministrados por el Global Hydrometrology Resource Center, en especial el satélite TRMM LIS very high resolution full climatology nos daría una resolución de $11km^2 * 11km^2$. lo cual entrega una resolución que se aproxima a las recomendaciones de la NTC 4552-1 de $3km^2 * 3km^2$. Con esto se logra mayor precisión sobre la variable de DDT .

Por otra parte, a pesar de que el RETIE establece en su artículo 3.14.1. indica que se puede aplicar la norma IEC 62305-2 para la valoración del nivel de riesgo frente a descargas atmosféricas (Ministerio de Minas y Energía, 2013, p. 74) en nuestro país, es importante tener en cuenta las diferencias de la norma IEC 62305-2 y las NTC 4552, ya que según (Ortega, s/f) “La Norma IEC 62305 presenta un modelo para las condiciones atmosféricas que no se adecua a la diversidad ambiental de Colombia y sobreestima los diseños que se obtengan a partir de esta norma” (p.5), entonces se considera necesario el tener una herramienta basado en la norma NTC 4552-2. Aunque se tienen software para este propósito en Colombia, se considera importante dar una herramienta que brinde una DDT acorde a las características espaciales del lugar, para que la persona que utilice el software Charlightning cuente con una herramienta para minimizar los riesgos de origen eléctrico en las personas, fauna y flora.

Al crear este software código libre, se brindan las bases y la posibilidad de que se comparta el código para estudios y mejoras posteriores de este, con esto se está resaltando el carácter público de la universidad, por este motivo se da el software de análisis de riesgo según la norma NTC

4552-2 en el lenguaje de programación Python, es importante resaltar además que este trabajo podría abrir otras líneas investigativas en la institución, en el campo de análisis de datos satelitales, y estos pueden ser a su vez utilizados en otras áreas, como por ejemplo en el análisis del calentamiento global o quizás en predecir comportamientos del clima, etc.

3. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Implementar un software de evaluación de manejo del riesgo, con el lenguaje de programación Python según la norma NTC 4552, a partir de datos experimentales de la densidad de descargas a tierra en el Valle de Aburrá.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar los referentes de densidad atmosférica de descarga a tierra en Colombia, para la obtención de una base de datos actualizada.
- Seleccionar los datos referentes a las coordenadas del Vallé de Aburrá y compararlos con la base de datos actualizada para la propuesta experimental sobre densidad atmosféricas de descarga a tierra en este sitio.
- Programar en Python el software de análisis de riesgo según la norma NTC 4552-2, para validar los datos de la comparación mediante pruebas del software.

4. Marco teórico

3.1 El rayo y el mapeo de rayos

El rayo es una descarga repentina de electricidad de alto voltaje que según (King, s/f) se produce de tres maneras: En la nube, nube-nube, nube-suelo. Hay alrededor de 40 a 50 destellos de rayos cada segundo, o casi 1.400 millones de rayos por año. (párr. 1) y según los autores Enrique y Castillo Anaya (2019), el mapeo de datos es importante porque ayuda a: Detección de tormentas, estimar lluvias, ciclones, peligros en la aeronáutica, incendios forestales, comprensión de fenómenos físicos de la tierra. (p. 9)

3.2 Tesis sobre software análisis de riesgo

Oscar Fernando Gil y Miguel Armando Paternina, presentaron una tesis titulada: “aplicación Android para la evaluación del riesgo eléctrico ante descargas atmosféricas según la norma NTC 4552” (Trejos & Rivera, 2017, p. 1), en donde según Trejos y Rivera (2017) en esta aplicación se calcula el nivel de riesgo al rayo, y fue realizado por medio del Software App Inventor. (p. 5)

3.3 Estudios sobre metodología de análisis de riesgo y DDT

3.3.1 Evaluación del riesgo por rayos para Colombia por Audrey Soley Cruz Bernal

Desarrolla y aplica “varias metodologías para determinar cuantitativamente los factores de riesgo. En la primera metodología se definieron e identificaron veinte subregiones naturales en Colombia. En la segunda, a partir de las estadísticas que tiene el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), se encontró un total de 1313 muertes a causa de rayos para el periodo comprendido entre 1997 y 2017. Paralelo a esto, y para el mismo periodo de tiempo, se obtuvo la densidad de población a nivel nacional y por subregiones. La tercera metodología consistió en calcular la DDT, el NC y la S para toda Colombia. Estos parámetros del rayo fueron obtenidos para el periodo 2012-2017 a partir de la información suministrada por la red LINET®, administrada por la empresa Keraunos SAS.” (Cruz-Bernal, 2019, p. 8)

3.3.2 Importancia del sondeo de datos en la Densidad de Descargas Atmosféricas a tierra; Aplicación del lenguaje lógica difusa en evaluación de riesgos de impacto de rayo en el valle de Matatipac

“La densidad de descargas atmosféricas a tierra es una variable importante y difícil de seleccionar al momento de determinar el riesgo por impacto de rayo. Se presenta la demostración experimental de la importancia estadística de este parámetro empleando información histórica de cinco años, obtenidos del registro de un radar de detección local. Se validan y corroboran los resultados de los cálculos efectuados a través de un estudio comparativo contra datos oficiales. Los resultados fueron aceptables; los datos objetivos de la zona se convierten en herramientas para incrementar la fiabilidad de la evaluación y su interpretación en seguridad atmosférica; con base en evaluaciones de casos prácticos con valores de Frontera, incluyendo aspectos de lógica difusa en la determinación” (Enrique & Castillo Anaya, 2019, p. 2)

3.4 Referente a la DDT para cálculos en la NTC 4552-2

N_d es la variable que utiliza la NTC 4552-2 para el cálculo según la estimación del promedio anual de descargas sobre la estructura ver Ecuación (1); en dicha ecuación la DDT reviste una vital importancia, pero “es de difícil selección, debido a diversos factores, como son la actualidad y precisión de los mapas, la definición, la resolución obtenida y el criterio del evaluador.” (Enrique & Castillo Anaya, 2019, p. 19)

La forma de evaluación de N_d es bajo la siguiente expresión:

$$N_d = DDT * AD * 10^{-6} \quad (1)$$

Donde:

DDT : Densidad de rayos a tierra $\left[\frac{\text{rayos}}{\text{km}^2\text{-año}} \right]$

AD = Área efectiva de la estructura aislada [m^2]

CD = Factor que toma en cuenta la influencia de la localización relativa del objeto a ser protegido (véase la Tabla 1)

En la Ecuación (1) Se puede ver que para hallar el promedio anual de descargas sobre la estructura (N_d) es necesario utilizar la variable DDT y según la según NTC 4552-2 “La densidad de rayos a Tierra DDT , se debe obtener de una red de localización de descargas o en su defecto mediante la utilización de la Ecuación (2)”, en este punto la NTC 4552-2 se refiere a un pie de página que dice lo siguiente: “Ecuación obtenida a partir de datos de Densidad de Rayos a Tierra en Colombia véase el literal A.5.2 de la NTC 4552-1.” (Icontec, 2008c, p. 25)

DDT puede ser evaluado con la siguiente expresión:

$$DDT = 0,0017 * N_C^{1,56} \quad (2)$$

Donde:

N_C : Número de días tormentosos al año

Tabla 1. *Factor de la localización Cd*

Localización relativa	Cd
Objetos rodeados de objetos o árboles más altos	0,25
Objetos rodeados de objetos o de igual o menos altura	0,5
Objetos aislados: sin objeto en la vecindad	1
Objeto aislado: en la cima de una colina o elevación	2

Fuente. Tomado de Tabla 10 (Icontec, 2008c, p. 10)

Referente al nivel cerámico o N_C para hallar la Ecuación (2) la NTC 4552-1 proporciona la Figura 1 donde indica “ N_C fue evaluado en áreas de 30 km * 30 km, encontrándose zonas con valores entre 11 y 289 días tormentosos año.” (Icontec, 2008c, p. 10)

La DDT en la NTC 4552-1 se encuentra en el literal A.5.2, donde presenta DDT típicas en Colombia en la Tabla 2, Tabla 3 y la Figura 2 y de igual manera aclara que un gran porcentaje que la DDT es más prevalente en el trópico que es subtropical. Con respecto al área de muestreo, indica que cuando se evalúa áreas $30km^2 * 30km^2$ se encuentra con más frecuencia, valores de DDT de 35 [*strokes/km² – año*]. En el caso de Colombia que está en la zona tropical hacer una valoración de áreas menores de $3km^2 * 3km^2$ es ideal para un diseño de SIPRA, pero este requiere un sistema localizado de descargas. (Icontec, 2008b, p. 36)

Tabla 2. Actividad de rayos en la geografía colombiana entre 1977 - 1999. Área = 1393 * 900 km²

Año	Cantidad de rayos	DDT $\frac{\text{strokes}}{\text{km}^2 - \text{año}}$
1997	2.875.670	2,29
1998	2.828.774	2,25
1999	1.987.061	1,58
2000	1.147.459	0,91
2001	1.888.503	1,5

Fuente. Tomado de Tabla A5 (Icontec, 2008a, p. 36)

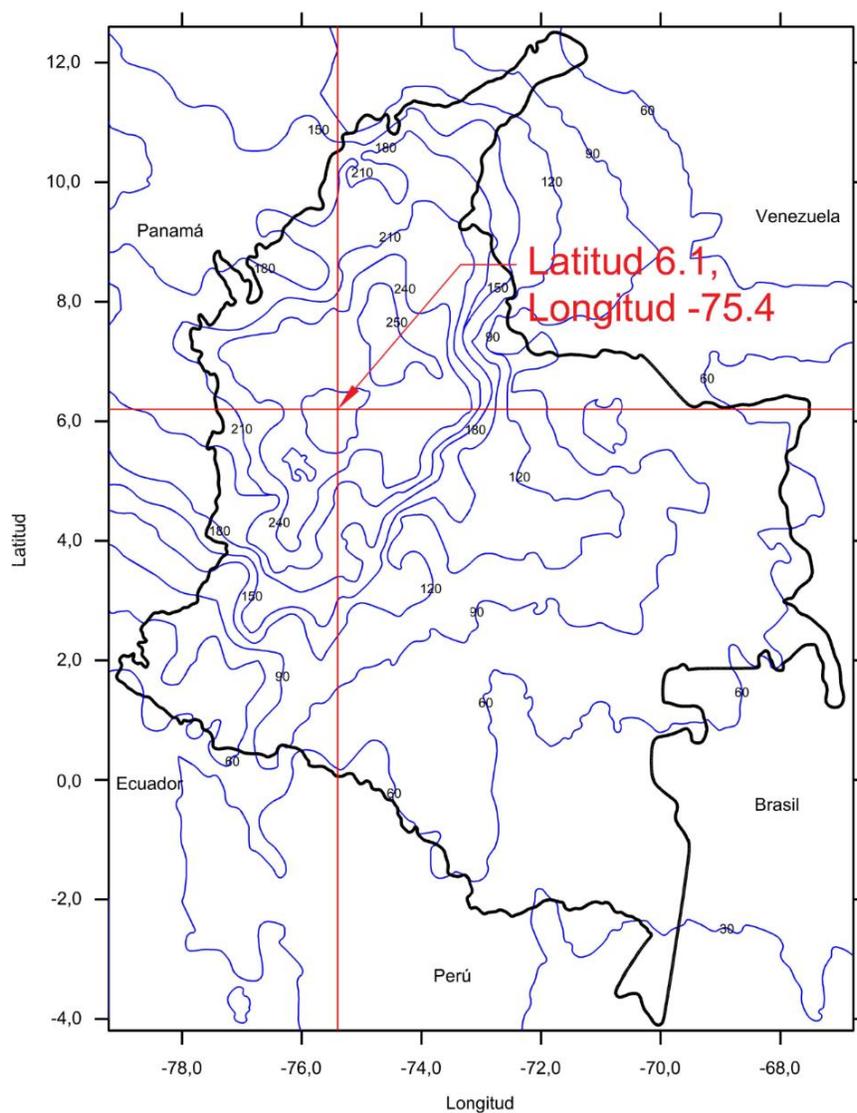


Figura 1 Mapa de ISO-Nivel cerámico para Colombia (Área de 30 km² x 30km²) –

Fuente. Adaptado de Figura A.9 (Icontec, 2008a, p. 35)

Nota: la línea y el texto rojo fue agregada para visibilizar la localización de Medellín

Tabla 3. *DDT para algunas ciudades de Colombia*

Ciudad	Latitud	Longitud	Densidad promedio
Barranquilla	10.9	-74.8	1
Cartagena	10.5	-75.5	2
Corozal	9.3	-75.3	3
El Banco	9.1	-74.0	10
Magangué	9.3	-74.8	5
Montería	8.8	-75.9	2
Quibdó	5.7	-76.6	9
Santa Marta	11.1	-74.2	2
Tumaco	1.8	-78.8	1
Turbo	8.1	-76.7	5
Valledupar	10.4	-73.3	2
Riohacha	11.5	-72.9	2
Armenia	4.5	-75.8	2
Barranca	7.0	-73.8	7
Bogotá	4.7	-74.2	1
Bucaramanga	7.1	-73.1	1
Cali	3.6	-76.4	1
Cúcuta	7.9	-72.5	1
Girardot	4.3	-74.8	5
Ibagué	4.4	-75.2	2
Ipiales	0.8	-77.6	1
Manizales	5.0	-75.5	2
Medellín	6.1	-75.4	1
Neiva	3.0	-75.3	1
Ocaña	8.3	-73.4	2
Pasto	1.4	-77.3	1
Pereira	4.8	-75.7	4
Popayán	2.4	-76.6	1
Remedios	7.0	-74.7	12
Villavicencio	4.2	-73.5	1
Bagre	7.8	-75.2	12
Samaná	5.4	-74.8	9

Fuente. Tomado de Tabla A.6 (Icontec, 2008a, p. 37)

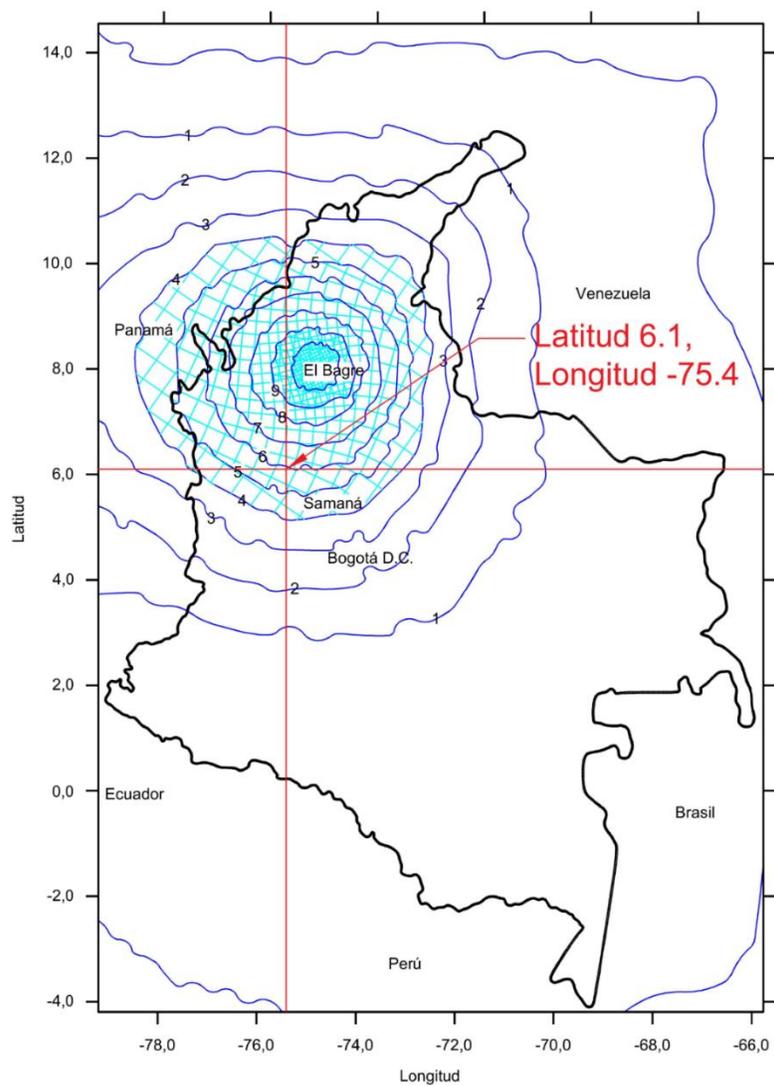


Figura 2 DDT Colombia 1999 (Área 300 km² * 300 km²)

Fuente: Adaptado de Figura A.10 (Icontec, 2008a, p. 36)

Nota: la línea y el texto rojo fue agregada para visibilizar la localización de Medellín

3.5 DDT de diferentes fuentes para Medellín

La Tabla 4 muestra de diferentes fuentes la DDT en la ciudad de Medellín.

Tabla 4. *DDT para Medellín (rayos/km² año)*

Fuente	DDT para Medellín
	$\frac{\text{rayos}}{\text{km}^2 - \text{año}}$
EPM	11.9
ISA	10 - 15
Torres y col	10.8, 42.3, 32.1*
Keraunos**	11.3

Fuente Elaboración propia los datos son tomados de (EPM, s/f, p. 20), (Porras, 2016, p. 8), (Torres et al., 2001, p. 4) y (Trujillo Del Río, 2018, p. 22)

Notas:

*Los datos varían ya que el autor utiliza tres fórmulas para hacer el cálculo; primera por medio de regresión múltiple, segunda Cigre/IEEE/IEC y tercera Eriksson, en las conclusiones de su trabajo da el primer resultado, según su trabajo es el que presenta menos porcentaje de error.

3.6 Formas de hallar DDT según NTC 4552-2

En este punto encontramos que la norma NTC 4552-2 indica 4 métodos para hallar la DDT, los cuales quedan a criterio del diseñador, dichos métodos son:

- Por medio de la ecuación (2) y refiriéndonos al mapa de Figura 1, que indica el nivel cerámicos para Colombia en 1999 con un área de 30 x 30 km². Ver numeral 1.1.1
- Refiriéndonos directamente al mapa Figura 2, donde se muestra directamente la DDT Colombia 1999 (áreas 300 km² x 300 km²). Ver numeral 1.1.2
- Si el cálculo se encuentra directamente en las ciudades mostradas en la Tabla 4, donde se puede obtener el valor de DDT para algunas ciudades de Colombia. Ver numeral 1.1.3
- Por medio de una red de localización de descargas a nivel local (la cual indica la norma NTC 4552-1 en la página 36 como la forma ideal).

3.7 Geolocalizadores de rayos global

3.7.1 Redes de localización de rayos mundial:

Existen redes de monitoreo de descargas eléctricas a nivel global como es el caso de la página web Real Time Lightning Map² donde indica, que es operados por voluntarios que muestra en

² <https://www.lightningmaps.org/>

tiempo real las descargas atmosféricas (Blitzortung.org, s/f, párr. 1), este tipo de páginas se puede visualizar la información en tiempo real ver Figura 3, y con un margen hasta de 7 días para proveer datos, también hay redes privadas, que prestan sus servicios con un registro y valor, como sería el caso de Vaisala.

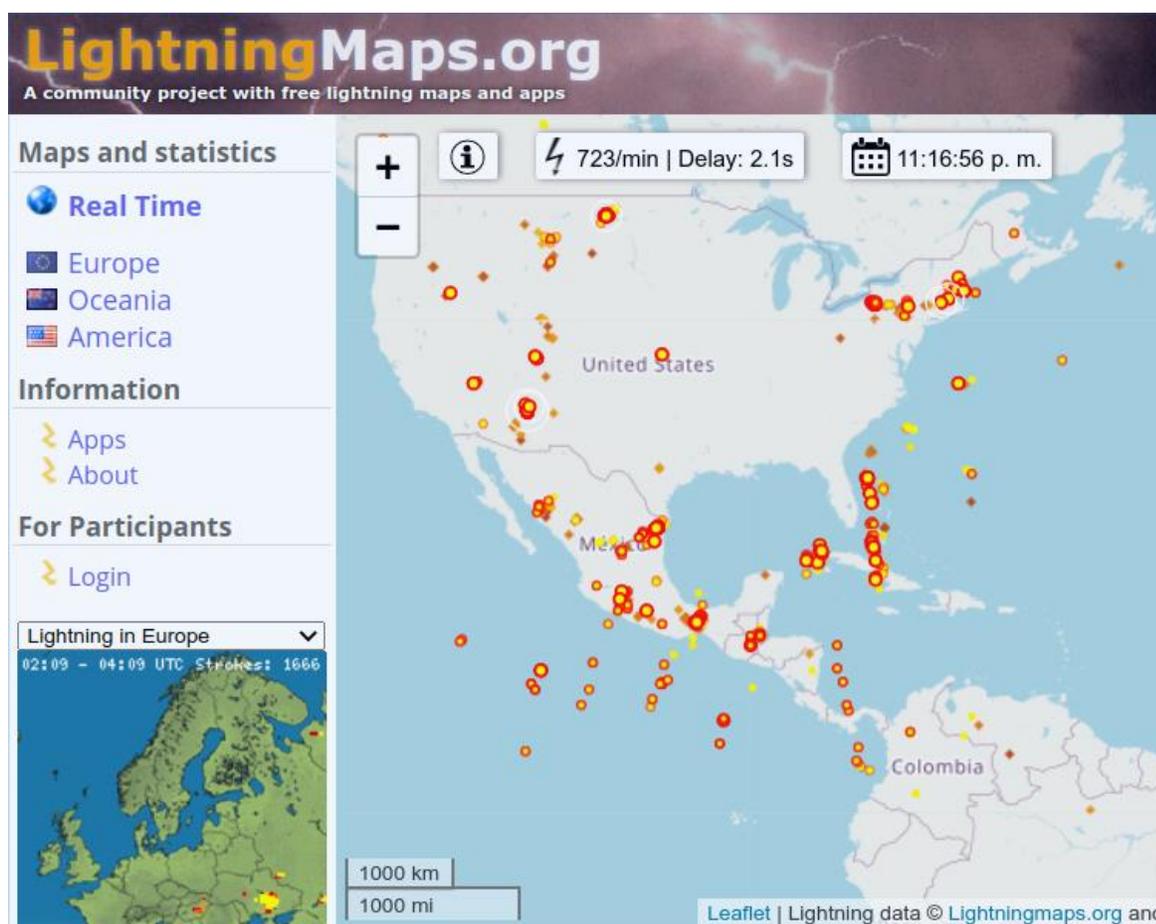


Figura 3 Mapa de descargas en tiempo real

Fuente: Tomado de <https://www.lightningmaps.org>

3.7.2 Detección de rayos satelital

El Centro Global de Recursos con sus siglas en inglés (GHRC) presenta diferentes datos al público, con el objetivo de hacer investigación, con respecto a las descargas atmosféricas según GHRC se tiene:

Sensor de imágenes de rayos ISS (LIS), es un detector de descargas atmosféricas eléctricas que cubre el espacio aéreo alojado en la estación espacial internacional ISS. El instrumento ISS LIS registra el momento en que ocurre un rayo, mide la energía radiante y estima la ubicación tanto en condiciones diurnas como nocturnas con una alta eficiencia de detección. El GHRC

DAAC actualmente genera productos de datos de rayos ISS LIS estándar y casi en tiempo real (NRT).

Sensor de imágenes de rayos TRMM (LIS): El sensor de imágenes de rayos TRMM (LIS) fue un detector de rayos alojado en el satélite Tropical Rainfall Measuring Mission. El instrumento TRMM LIS registró el momento en que ocurrió un rayo, midió la energía radiante y estimó la ubicación tanto en condiciones diurnas como nocturnas con una alta eficiencia de detección. Este instrumento es idéntico al instrumento ISS LIS

El Detector óptico de transitorios (OTD): El conjunto de datos de climatología de muy alta resolución de TRMM LIS contiene climatologías cuadrículadas de las características de los rayos medidas por el sensor de imágenes de rayos (LIS). Llamándose climatología TRMM LIS / OTD, aglomerado de información de climatología LIS / OTD contiene varias climatologías cuadrículadas de las características de los rayos derivadas de la combinación del detector óptico de transitorios (OTD) y las mediciones del sensor de imágenes de rayos (LIS) TRMM. (GHRC, s/f)

3.8 Geo localizadores de rayos en Colombia

3.8.1 Sistema de Información de Descargas – SID:

“El Sistema de Información de Descargas – [SID], propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. – [ISA], cuenta actualmente con 6 estaciones de medición en las cuales se instalaron sensores LS7000 fabricados por Vaisala Inc. ubicados en algunos aeropuertos del país”. (pag.18 Pérez y Jesús, 2014). "La ubicación de los sensores se puede ver en la Tabla 4. Los datos se almacenan en la base de datos del SUI (Sistema Único de Información), administrada por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas)." (Aranguren et al., 2015, p. 29)

3.8.2 Keraunos S.A.S:

Esta compañía surge en base a la empresa alemana Nowcast GmbH dedicada a la investigación de descargas atmosféricas en Colombia. Keraunos con presencia importante en Colombia, ofrece servicio en la detección, medición, predicción y protección contra rayos.

Otorgando monitoreo constante y predicción de posibles desarrollos de tormentas eléctricas. Esta compañía ha puesto en sus puntos de medición la tecnología LINET, actualmente la red de localización es propia y tiene la cantidad de 10 estaciones de medición. (Torres et al., 2001, p. 21)

3.9 Software Mitigación y Control de Riesgo - Análisis de Riesgos en Colombia.

Existen varios softwares para la mitigación y control del riesgo en Colombia, alguno de ellos se lista a continuación al igual que sus principales características

3.9.1 Ciprotec

Software análisis de riesgo con base en la NTC 4552 – 2

“Todo lo que se haga para el adecuado funcionamiento de los dispositivos, equipos y sistemas eléctricos es necesario: y por la preservación de la vida humana es indispensable”

Software para “Análisis de Riesgo” fue diseñado para realizar cálculos de los riesgos ocasionados por el rayo y aportar información para el diseño del SIPRA. Seleccionar medidas de mitigación de los riesgos y generar memorias respectivas al análisis (Laumayer, s/f)

La descarga se puede realizar en (Laumayer, s/f)

4 Metodología

4.1 Tipo de proyecto

El tipo de investigación realizado es de tipo aplicado ya que en palabras de Botero Henao (2017) se "basa en encontrar mecanismos o estrategias para alcanzar el objetivo propuesto y dar solución a un problema"(p. 2), con miras a buscar correlación entre el concepto de DDT y las implicaciones que este tiene en el análisis de riesgo según la norma NTC 4552. En donde se utilizarán datos medibles que se acerca a una investigación cuantitativa.

4.2 Método

Se comparte el método inductivo deductivo, con la recolección de datos se procede de manera inductiva, con un análisis particular hacia lo general. Recolectando información para sistematizar, ocasionado unas fases consiguientes que significan interpretar por núcleos temáticos y construcción teórica. Luego deductivamente, de lo general a lo particular.

5 Resultados del proyecto

5.1 Formas de determinar DDT mediante NTC 4552-2

El subtítulo 4.6 indica 4 métodos para hallar la DDT en la norma NTC 4552-2, los cuales quedan a criterio del diseñador. Se procede en este punto a manera de ejemplo encontrar la DDT en la ciudad de Medellín. Se descarta encontrar el valor por medio de una red de localización de descargas a nivel local ya que depende de datos externos de los cuales no se cuentan en su momento, pero se considera que los tres siguientes ejemplos son suficientes para explicar el punto en cuestión.

5.1.1 Ejemplo 1 por medio Ecuación (2) y refiriéndonos al mapa Figura 1

Por medio de la Ecuación (2) y refiriéndonos al mapa Figura 1. se toma una Latitud = 6.1 y Longitud = -75.4 que son las coordenadas aproximadas de la ciudad de Medellín, dicho paso se puede ver en la Figura 1. Se tiene un N_c de 250. al reemplazarlo en la Ecuación (2) se tiene la $DDT = 9,359 \frac{\text{rayos}}{\text{km}^2\text{-año}}$, para para la ciudad de Medellín.

5.1.2 Ejemplo 2 por medio de mapa Figura 2

Para resolver por medio del mapa Figura 2 Se toma una Latitud = 6.1 y Longitud = -75.4 que son las coordenadas aproximadas de la ciudad de Medellín, dicho paso se puede ver en la Figura 2, Se tiene una $DDT = 5 \frac{\text{rayos}}{\text{km}^2\text{-año}}$, para para la ciudad de Medellín

5.1.3 Ejemplo 3 tomando la Tabla 4

Al mirar directamente en la Tabla 4, donde se puede ver que la $DDT = 1 \frac{\text{rayos}}{\text{km}^2\text{-año}}$, para para la ciudad de Medellín.

En los ejemplos desarrollados del título 6.1 se puede ver que la DDT cambia significativamente según el método que se utilice para una misma coordenada de ubicación; en donde para un mismo sitio se tienen valores DDT de 9.359; 5 y $1 \frac{\text{rayos}}{\text{km}^2\text{-año}}$. Es por este motivo que se presenta un procedimiento para determinar la DDT mediante el software Charlightning, el cual se describe en la sección 6.2.

5.2 Procedimiento para determinar la DDT en el software Charlightning.

El programa utiliza los datos del programa NASA Earth Science Data³, Los datos que se tienen en cuenta para determinar la DDT fueron tomados del LIS Very High Resolution Gridded Climatology file, el cual toma la media anual de descarga que fueron adquiridos desde 1998 hasta el 2013, tiene una cobertura espacial de N: 38, S: -38, W: -180, E: 180, y una resolución espacial de 0.1°. (Albrecht, Rachel I., Goodman, Steven J., Buechler, Dennis E., Blakeslee, Richard J., & Christian, Hugh J., 2016, p. 3)). Con este dato y con la longitud terrestre en el meridiano de ecuador que pasa por Colombia donde un grado equivale aproximadamente a 111,1 Km terrestre, se obtiene una resolución de $11km^2 * 11km^2$.

La variable analizada es el total de *flashes/km² – año*, que comprende el total de descargas ascendente, descendentes con polaridad positiva +CG, descendente con polaridad negativa -CG, e intra-nube IC; con el objetivo de separar las descargas -CG. Se toma en cuenta el trabajo de (Erdmann et al., 2019) donde realiza un trabajo de comparación entre los datos obtenidos desde una red terrestre y los compara con los datos de una red satelital en este caso la TRMM, donde indica que de 2144 pulsos y rayos analizados 487 son descargas nube a tierra y 1657 pertenecen a descargas nube a nube. (p. 872) lo cual corresponde a un Ratio de 0.227 de las descargas totales. Luego Figura 4 muestra el esquema del algoritmo utilizado en el programa, el cual entre una ubicación espacial de Longitud y Latitud ingresada por el usuario obtiene las descargas de DDT en la variable *flash/km² – año*.

La Figura 5 muestra un mapa del municipio de Antioquia donde se puede ver en la coordenada Latitud 7.55 y Longitud -75.35 que concuerda con lo que Albrecht, Goodman, Buechler, Blakeslee, & Christian, indican como el 4to punto caliente en del ranking global del mundo, el cual fue realizado con los datos que se procesan en el software Charlightning.

³ Los datos pueden ser descargados de: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/pub/lis/climatology/LIS/VHRC/doc/>

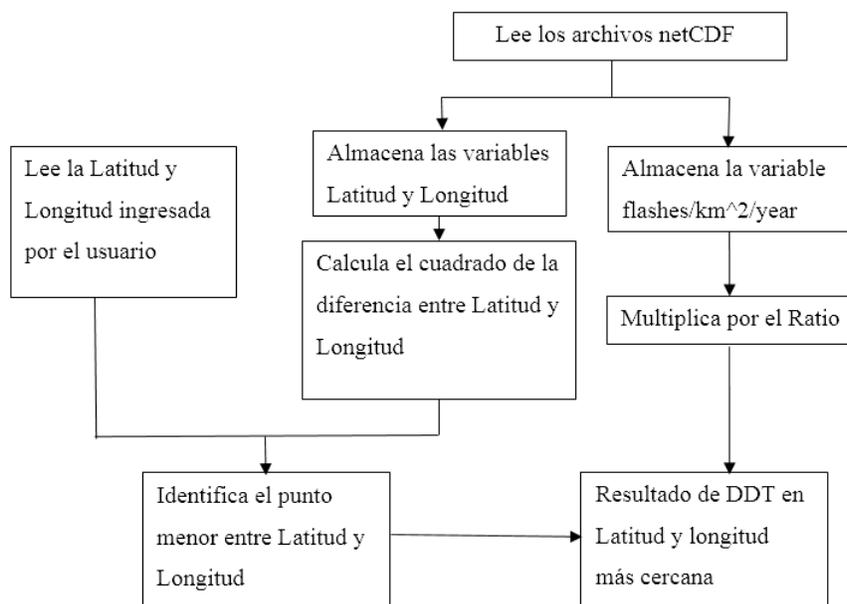


Figura 4. Esquema funcionamiento algoritmo variable DDT

Fuente: Elaboración propia

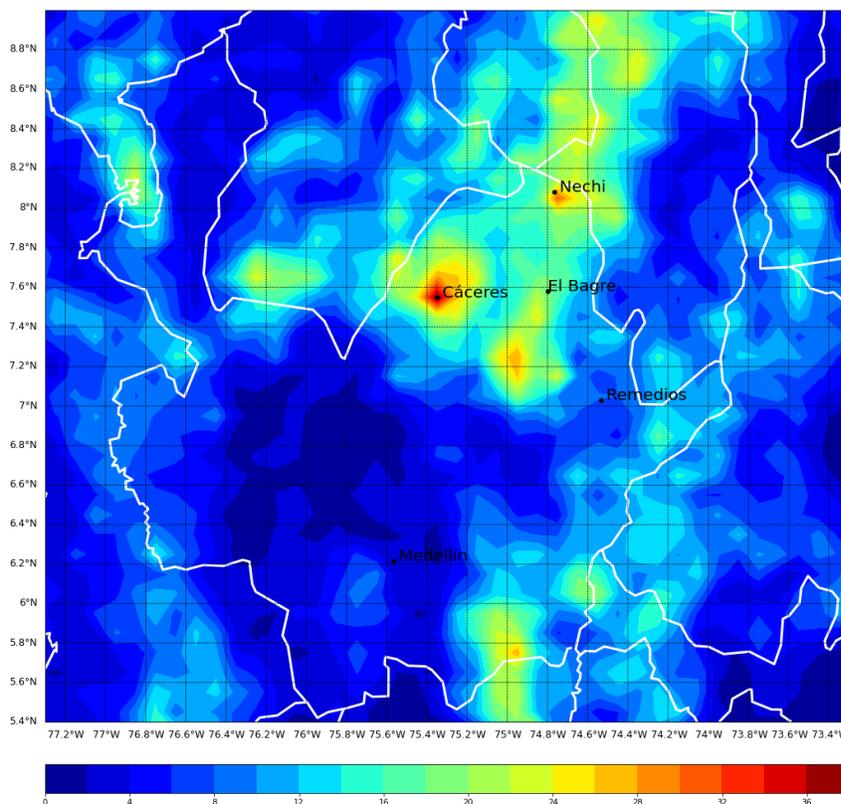


Figura 5. Mapa de DDT del departamento de Antioquia

Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Comparación de los datos DDT frente a NTC 4552-2

En la Tabla 5 se realizó una comparación entre la DDT de la Tabla A.6 de la NTC 4552-1 y el software Charlightning en donde muestra un aumento en la DDT de en todas las ciudades exceptuando 4 de ellas. Los datos también afirman lo que (Younes-Velosa, 2020) indica “hoy, gracias a diversas investigaciones, especialmente a través de misiones espaciales de la NASA, se sabe con certeza que en el mundo hay lugares con mayores valores de este parámetro, especialmente en la zona tropical continental”

5.3 Características del software

El software Charlightning⁴ se realizó, con la característica de ser una herramienta de libre acceso y código libre, por esto será implementado en el lenguaje de programación Python, con el propósito de que pueda ser optimizado el código, utilizado posteriormente en la mejora del software. También se compilo el programa para que puede ser utilizado en Linux, Windows y Mac, en sistemas de 32 y 64 bits.

Por otra parte, teniendo en cuenta la filosofía y el diseño del software IEC Risk Assessment Calculator que está basado en la norma IEC 62305 de la cual se soporta la norma NTC 4552-2, de Colombia. Se hizo una interfaz sencilla e intuitiva para que el usuario, pueda interactuar fácilmente con el software. Es también interesante destacar que el software al estar basado en la norma IEC 2006, también puede ser utilizado en otros lugares fuera de Colombia que estén localizados entre las latitudes 37.95 y -37.95.

Es de aclarar que el cálculo de riesgo que realiza el software Charlightning pretende orientar en el análisis de diversos criterios que determinan el riesgo de pérdidas debidas al rayo. Pero no es posible cubrir todos los elementos especiales de una estructura que puedan hacer que sufra más o menos daños debido al rayo. En casos especiales hay factores económicos y personales que podrían ser muy importantes y considerarse junto con el índice obtenido mediante esta herramienta. Se pretende que este programa se utilice en combinación con la versión escrita de la norma NTC 4552-2

⁴ Dirección el código del software en GitHub <https://github.com/sergioesv/Charlightning.git>

Tabla 5. Comparación de la DDT para algunas ciudades de Colombia entre NTC 4552-1 y software Charlightning

Ciudad	Latitud	Longitud	Densidad promedio	Densidad software Charlightning
Barranquilla	10.9	-74.8	1	2.34
Cartagena	10.5	-75.5	2	4.05
Corozal	9.3	-75.3	3	4.75
El Banco	9.1	-74.0	10	11.4
Magangué	9.3	-74.8	5	12.28
Montería	8.8	-75.9	2	2.48
Quibdó	5.7	-76.6	9	9.31
Santa Marta	11.1	-74.2	2	1.29
Tumaco	1.8	-78.8	1	0.34
Turbo	8.1	-76.7	5	8.05
Valledupar	10.4	-73.3	2	3.05
Riohacha	11.5	-72.9	2	4.24
Armenia	4.5	-75.8	2	1.94
Barranca	7.0	-73.8	7	10.76
Bogotá	4.7	-74.2	1	0.76
Bucaramanga	7.1	-73.1	1	1.48
Cali	3.6	-76.4	1	1.62
Cúcuta	7.9	-72.5	1	0.81
Girardot	4.3	-74.8	5	2.97
Ibagué	4.4	-75.2	2	2.38
Ipiales	0.8	-77.6	1	2.54
Manizales	5.0	-75.5	2	2.62
Medellín	6.1	-75.4	1	2.21
Neiva	3.0	-75.3	1	2.72
Ocaña	8.3	-73.4	2	2.8
Pasto	1.4	-77.3	1	0.89
Pereira	4.8	-75.7	4	5.25
Popayán	2.4	-76.6	1	2.78
Remedios	7.0	-74.7	12	11.4
Villavicencio	4.2	-73.5	1	4.68
Bagre	7.8	-75.2	12	23.47
Samaná	5.4	-74.8	9	21.4

Fuente: (Icontec, 2008a, p. 37) adaptación propia agregando Densidad software Charlightning

El software Charlightning presenta unas variables las cuales permite que el usuario puede cambiar libremente Tabla 6, otras que presentan un límite para cambiarlo Tabla 7 y otras que no son posible el cambio Tabla 8.

Tabla 6. *Parámetros software Charlightning que puede cambiar libremente*

Parámetros que el usuario puede cambiar libremente	Abreviación
Medidas, de largo ancho y altura a ser protegida	L, W, H
Densidad de descarga tierra	DDT
Factor de localización	Cd
Factor ambiental	Ce
Tipo de servicio (líneas de poder, otros servicios aéreos y subterráneos	
Probabilidad de daño a la estructura por descargas directas a la estructura	PB
Probabilidad de falla en sistemas internos cuando el servicio cuenta con DPSs	PSPD
Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende del riesgo de fuego de la estructura	rf
Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende de medidas de protección tomadas para reducir las consecuencias de incendio.	rp
Factor de incremento de pérdida debida a daños físicos por presencia de condiciones especiales peligrosas	hz

Fuente: Adaptado de (Surtees, Gillespie, Kern, & Rousseau, 2005)

Tabla 7. *Parámetros software Charlightning presentan un límite al ser cambiado por el usuario*

Parámetros que presentan un límite al ser cambiado por el usuario	Abreviación
Factor de eficacia del apantallamiento de la estructura.	KS1
Factor de características del cableado interno	KS3
Probabilidad de falla de sistemas internos (impactos al servicio)	PLD
Probabilidad de falla de sistemas internos (Impactos cercanos al servicio)	PLI
Pérdidas por daños físicos	Lf
Pérdidas por daños físicos	Lo

Fuente: Adaptado de (Surtees et al., 2005)

5.3.1 Interfaz Gráfica

El programa presenta una ventana de inicio donde se pueden ingresar los datos del proyecto ver Figura 6, luego aparece una pantalla donde se permite ingresar las características de la estructura, y la influencia ambiental ver Figura 7, en la siguiente ventana si ingresa la línea que llegan a la estructura y las medidas de protección adoptadas ver Figura 8. Por último, aparece una pantalla que muestra las opciones para calcular el tipo de pérdidas de la estructura. ver Figura 9. También en la ventana 1 existe un botón que permite el cálculo de la DDT de manera ver Figura 10 y luego al ingresar los datos aparece una pantalla que indica cuanto es la DDT en las

coordenadas ingresadas, que luego son presentadas en los cálculos. Al realizar los respectivos cálculos en la parte inferior muestra los 4 tipos de riesgo y los resultados del análisis.

Tabla 8. *Parámetros software Charlightning que no pueden ser cambiado por el usuario*

Parámetros que no pueden ser cambiados por el usuario	Abreviación	Valor
Longitud de la sección de la acometida de servicio	Lc	1 000 m
Altura de los conductores del servicio sobre el suelo	Hc	6 m
Número de eventos peligrosos debido a impactos sobre estructura adyacente “a” de donde proviene la acometida	NDa	0
Factor de eficacia del apantallamiento interno de la estructura	KS2	1
Factor de soportabilidad al impulso tipo rayo del sistema a proteger	KS4	1
Probabilidad de lesiones a seres vivos a causa de tensiones de paso y contacto por descargas directas a la estructura	PA	1
Factor reductor de pérdida de vidas por características del suelo o terreno	ra	0,10
Pérdidas por lesiones a seres vivos por tensiones de paso y contacto	Lt	0,01
Resistividad de terreno	ρ	500 Ω .m

Fuente: Adaptado de (Surtees et al., 2005), (International Electrotechnical Commission, 2006, p. 213)

5.3.2 Informe de Cálculos

El programa presenta los cálculos en un documento en formato PDF ver anexo A

Charlightning NTC-4552

Seleccione el modo de trabajo

Datos del proyecto

Proyecto:

Diseñador:

Dirección:

Teléfono:

Descripción:

Diseñado por: Sergio Andrés Estrada Vélez Versión 0.0.7 2002-05-06

Figura 6. Ventana inicial software Charlightning
Fuente: Elaboración propia

Tab1 Tab2 Tab3 **Tab4** Tab5

Dimensiones de la estructura

Longitud de la estructura [m]:

Ancho de la estructura [m]:

Altura de la estructura[m]:

Altura máxima de la estructura[m]:

Medida total de la estructura [m2]:

Riesgo de incendio y daños físicos

Riesgo de fuego en la estructura:

Eficacia del apantallamiento:

Tipo de cableado interno:

Influencia ambiental

Localización relativa:

Factor ambiental:

Resistividad del terreno [Ω.m]

Densidad Descarga a Tierra Antioquia

Riesgos calculados

	Riesgo tolerable	=>	Riesgo por impacto directo	+	Riesgo por impacto indirecto	=	Riesgo calculado
Perdidas de vidas humanas:	1.00E-5	=>	<input type="text"/>	+	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
Perdida de servicios públicos:	1.00E-3	=>	<input type="text"/>	+	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
Perdida de patrimonio:	1.00E-3	=>	<input type="text"/>	+	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>
Perdidas económicas:	1.00E-3	=>	<input type="text"/>	+	<input type="text"/>	=	<input type="text"/>

Figura 7. Ventana principal software Charlightning dimensiones de la estructura e influencia ambiental
Fuente: Elaboración propia

Tab1 Tab2 Tab3 Tab4 Tab5

Línea eléctrica
 Línea que llega a la estructura: Aerea
 Tipo de cableado externo: Apantallado
 Existencia de transformador: Transformador

Otros servicios aéreos
 Número de servicios conducidos: []
 Tipo de cableado externo: No apantallado

Otros servicios subterráneos
 Número de servicios conducidos: []
 Tipo de cable externo: Apantallado

Medidas de protección
 Clase de SPSR: Nivel II
 Protección contra incendios: Sistemas manuales
 Protección contra sobretensiones: Solo en entrada de servicios

Riesgos calculados

	Riesgo tolerable		Riesgo por impacto directo		Riesgo por impacto indirecto		Riesgo calculado
Perdidas de vidas humanas:	1.00E-5	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdida de servicios públicos:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdida de patrimonio:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdidas económicas:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]

Calcular
 Regresar
 Informe

Figura 8. Ventana principal software Charlightning líneas que llegan y medidas de protección
 Fuente: Elaboración propia

Tab1 Tab2 Tab3 Tab4 Tab5

Tipos de pérdida
 Riesgos especiales para la vida: Nivel alto de pánico
 Por incendios: Iglesias, museos
 Por sobretensiones: Riesgo de explosión

Pérdida de servicios esenciales
 Por incendios: Suministro eléctrico
 Por sobretensiones: Suministro de gas

Pérdida del patrimonio cultural
 Por incendio: Perdidas irremplazables

Pérdidas económicas
 Riesgos económicos especiales: Riesgos de contaminación
 Por incendios: Oficina, escuela
 Por sobretensiones: Zona agrícola
 Por tensión de paso y de contacto: Ganado en el exterior
 Riesgos económicos especiales: 1 en 100 años

Riesgos calculados

	Riesgo tolerable		Riesgo por impacto directo		Riesgo por impacto indirecto		Riesgo calculado
Perdidas de vidas humanas:	1.00E-5	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdida de servicios públicos:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdida de patrimonio:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]
Perdidas económicas:	1.00E-3	=>	[]	+	[]	=	[]

Calcular
 Regresar
 Informe

Figura 9. Ventana principal software Charlightning el tipo de pérdidas de la estructura
 Fuente: Elaboración propia

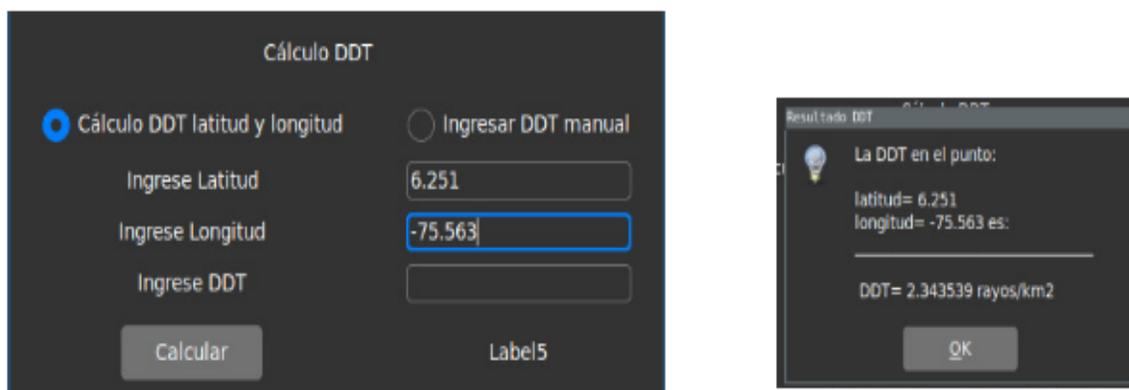


Figura 10. Ventana principal software Charlightning cálculo DDT

Fuente: Elaboración propia

5.4 Comparación resultados software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator.

La Tabla 9 presenta 3 casos hipotéticos, donde se utilizan diferentes variables de cálculo teniendo en cuenta diferentes características, ya sean ambientales, de locación o servicios que prestan. Los casos fueron planteados para tener valores en los 4 riesgos (perdida de vida humana, pérdidas de servicios públicos, pérdida del patrimonio y pérdidas económicas), esto con el fin de comparar los resultados entre el IEC Risk Assessment Calculador y el software Charlightning. Las tablas Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 muestra el error absoluto de entre software, se tiene con esto una correlación entre los programas frente al cálculo de riesgo.

Con respecto al software IEC Risk Assessment Calculador frente al software Charlightning el primero presenta una mejor documentación en cuanto a los parámetros, ofrece guardar los datos y se puede utilizar en tres idiomas. El segundo presenta con un cálculo para determinar la DDT mediante coordenadas geográficas, los datos se presentan actualizados, en el primero esos datos debían ser exportados de otras fuentes.

Tabla 9. Casos comparación Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator.

Casos estudio	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Dimensiones de la estructura:			
Dimensiones de la estructura	20, 20, 40	50, 32, 30	50, 32, 30
Características de la estructura			
Riesgo de incendio y daños físicos	Normal	Bajo	Alto
Eficacia del apantallamiento	Media	Buena	Buena
Tipo de cableado interno	No apantallado	Apantallado	Apantallado
Influencias ambientales			
Situación respecto a los alrededores	Estructura aislada	Altura similar	Altura similar
Factor ambiental	Urbano	Edif. Altos en la ciudad	Edif. Altos en la ciudad
DDT	3	1	5
Líneas eléctricas			
Líneas que llegan a la estructura	Cable enterrado	Cable enterrado	Cable enterrado
Tipo de cableado externo	No apantallado	Apantallado	Apantallado
Existencia de transformado MT/BT	Sin transformador	Transformador	Transformador
Otros servicios aéreos			
Número de servicios conducidos	0	1	1
Tipo de cableado externo	No apantallado	Apantallado	Apantallado
Otros servicios enterrados			
Número de servicios conducidos	0	1	1
Tipo de cableado externo	No apantallado	Apantallado	Apantallado
Medidas de protección			
Clase de SPCR	Nivel 4	Sin SPCR	Sin SPCR
Protección contra incendios	Sistemas manuales	Sin medidas	Sin medidas
Protección contra sobretensiones	Solo en la entrada de los servicios	Sin protección	Sin protección
Tipo 1- Pérdidas de vidas humanas:			
Riesgos especiales para la vida	Problemas de evacuación	Problemas de evacuación	Riesgo pánico alto

Tabla 9
Continuación

Por incendios	colegios, comercios	Hospitales, hoteles	Comercios colegios
Por sobretensiones	No aplica	Hospitales	Hay sistemas de seguridad críticos
Tipo 2- Pérdidas de servicios esenciales:			
Por incendios	No hay servicios esenciales	No hay servicios esenciales	Suministro eléctrico
Por sobretensiones	No hay servicios esenciales	No hay servicios esenciales	Suministro eléctrico
Tipo 3 - Pérdidas de patrimonio cultural			
Por incendios	Sin valor histórico	Sin valor histórico	Pérdidas irremplazables
Tipo 4 - Pérdidas económicas			
Riesgos económicos especiales	Sin riesgos especiales	Sin riesgos especiales	Riesgos de contaminación
Por incendios	Propiedad comercial	Hospitales, hoteles	Propiedad comercial
Por sobretensiones	Iglesias, prisión, zonas públicas	Hospital, hotel, oficina	Zona industrial y comercial
Por tensiones de paso/contacto	Ganado en el interior	sin riesgo de shock	sin riesgo de shock
Riesgo tolerable de pérdida económica	1 en 1000 años	1 en 1000 años	1 en 1000 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. *Resultado comparativo software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 1*

	Riesgo calculado			
	R1	R2	R3	R4
Charlightning	4,38E-05	0	0	8,66E-04
Risk *	4,38E-05	0	0	8,70E-04
Error absoluto	0	0	0	4,00E-06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. *Resultado comparativo software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 2*

	Riesgo calculado			
	R1	R2	R3	R4
Charlightning	4,84E-05	0	0	3,39E-04
Risk *	4,98E-05	0	0	3,52E-04
Error absoluto	1,4E-06	0	0	1,3E-05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. *Resultados comparativos software Charlightning con IEC Risk Assessment Calculator caso 3*

	Riesgo calculado			
	R1	R2	R3	R4
Charlightning	8,07E-03	3,23E-04	1,61E-03	1,63E-01
Risk *	8,09E-03	3,30E-04	1,62E-03	1,63E-01
Error absoluto	2,0E-05	7,00E-06	1E-05	0

Fuente: Elaboración propia

6 Conclusiones

Se presenta el Software Charlightning basado en la norma NTC 4552, en el lenguaje de programación Python, tiene la característica de ser una herramienta de libre acceso, multiplataforma y código abierto. Los datos arrojados al hacer una comparación con el software Risk Assessment Calculador presenta un máximo error absoluto de $1E-05$, también es importante resaltar que la diferencia de este programa radica en la forma en que se dispone de la variable DDT, esta al ser fundamental en el cálculo se presenta de manera directa, actualizada y en forma global (entre las coordenadas N: 38, S: -38, W: -180, E: 180) en el software Charlightning; mientras que en el Risk Assessment Calculador, se debe recurrir diferentes fuentes para determinar dicha variable.

Se propone un procedimiento para determinar la DDT mediante el software Charlightning, con los datos de libre acceso de la NASA, del satélite TRMM LIS very high resolution full climatology, el cual toma la media anual de descarga que fueron adquiridos desde 1998 hasta el 2013, donde por medio de un algoritmo se obtiene DDT con una cobertura espacial entre N: 38, S: -38, W: -180, E: 180. Con un área de $11.1 \text{ km}^2 \times 11.1 \text{ km}^2$ de resolución. La DDT que arroja el Software Charlightning fue contrastada con la Tabla A.6 de la NTC 4552-1, donde presenta una relación en cuanto los datos según los puntos de ubicación, pero con mayor valor en los datos presentados.

La norma NTC 4552 es adecuada en la norma IEC 62305 del 2006. El Software Charlightning al ser realizado bajo dicha norma, el programa se puede utilizar de forma orientadora, en el ámbito internacional. Pero haciendo la aclaración que la IEC 62305 del 2006 fue derogada, y actualizada a la versión 2010.

7 Recomendaciones

En el desarrollo del proyecto surgen aspectos que se evidenciaron los cuales pueden ser mejorados a futuro, el software que se entrega, más que ser un producto terminado, está concebido para generar una nueva línea de investigación en la institución. Los aspectos en los que se puede profundizar se describen continuación:

- Generar una un panel de ayuda donde el usuario al enfocar cada cuadro de dialogo lo remita a las variables utilizadas, en pro de una mejor comprensión de la norma.
- Integrar traducciones del programa a diferentes idiomas.
- Adicionar opción de guardar proyectos, cambio de contraste, aumento de letra, sonidos, atajos, etc. todas las mejoras que se pueden tener para las personas con algún tipo de discapacidad.
- La Tabla 7 y Tabla 8 muestran las variables que pueden ser cambiadas en parte y las que no pueden ser modificadas, para que le programa tenga más opciones en los cálculos se pueden integrar más variables en las selecciones por el usuario.
- El software al estar pensado para hacer un cálculo simplificado, no toma en cuenta la estructura adyacente y la separación por zonas. Se puede adicionar dichos cálculos al programa.
- Integrar un mapa donde se obtenga la ubicación de la dirección del lugar, para tener una mejor visualización de la DDT.
- Generar una base de datos online donde se integre los resultados de los cálculos realizados por un usuario y posteriormente se puedan verificar por cualquier persona el resultado.
- Respecto al informe que entrega el programa, se pueden integrar todas las variables que se usan para el cálculo y los resultados.
- Tomar los datos satelitales del ISS/TRMM los cuales parten a partir de 2018, con miras a determinar la DDT.
- Contrastar los datos de DDT que arroja el programa con los datos de diferentes en tierra como la red Linet.
- El software está basado en la norma NTC 4552 donde esta es una adecuación de la IEC62305 (2006). Se recomienda integrar la norma IEC62305 (2010).

- Generar de forma gráfica de los riesgos más relevantes, para indicar al usuario en cual debe tomar mayores medidas de prevención.
- Generar de forma gráfica la obtención del área de las estructuras.
- Integrar el método de esfera rodante para determinar de forma gráfica la ubicación de las puntas captadoras, teniendo en cuenta las distancias de la NTC 4552-3 y IEC 62305.
- Integrar el formulario del Anexo F de la NTC 4552-1 sobre “Guía general de seguridad personal durante tormentas eléctricas” (Icontec, 2008a, p. 68) con el fin de hacer encuestas periódicas, donde se toman acciones preventivas en pro de tener acciones para la seguridad personal.
- Para un análisis detallado de riesgo eléctrico se recomienda usar la norma NTC 4552, el software está diseñado para orientar el análisis del riesgo, mas no pretende reemplazar dicha norma.

8 Referencias bibliográficas

- Albrecht, Rachel I., Goodman, Steven J., Buechler, Dennis E., Blakeslee, Richard J., & Christian, Hugh J. (2016). *LIS 0.1 Degree Very High Resolution Gridded Lightning Climatology Data Collection (lisvhrcC)* [Data set]. NASA Global Hydrometeorology Resource Center DAAC. <https://doi.org/10.5067/LIS/LIS/DATA306>
- Aranguren, H. D., Tovar, C., Inampues, J., Lopez, J., Soto, E., & Torres, H. (2015). Lightning effects on distribution transformers and reliability of power distribution systems in Colombia: Efecto de los rayos sobre transformadores de distribución y confiabilidad de sistemas de distribución de energía en Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 35(1Sup), 28–33. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1Sup.54069>
- Blitzortung.org. (s/f). Lightning & Thunderstorms—Cover Your Area. Recuperado el 21 de octubre de 2021, de https://www.blitzortung.org/en/cover_your_area.php
- Botero-Henao, O. I. (2017). *Tópicos de Investigación*. Recuperado de <http://media0.webgarden.es/files/media0:5a2063962fc1d.pdf.upl/T%C3%B3picos%20de%20Investigaci%C3%B3n.pdf>
- Cruz-Bernal, A. S. (2019). *Evaluación del riesgo por rayos para Colombia* (Universidad Nacional de Colombia). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75636/ASCB_Evaluaci%C3%B3n%20del%20riesgo%20por%20rayos%20para%20Colombia.pdf?isAllowed=y&sequence=1
- Enrique, E., & Castillo Anaya, E. (2019). *Importancia estadística de la densidad de descargas atmosféricas a tierra; lógica difusa en la evaluación de riesgos de impacto de rayo en el valle de matatipac*. 20, 7. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/331949149_Statistical_importance_of_Atmosph

eric_Discharge_Density_to_Earth_Fussy_Logic_to_Lightning_Impact_Risk_Assessment
_in_the_Matatipac_Valley

EPM. (s/f). *ANEXO A: Caracterización de los parámetros meteorológicos en las zonas de influencia del grupo EPM*. Recuperado de

https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Dise%C3%B1o/Anexo%20A-

[Par%C3%A1metros%20Meteorol%C3%B3gicos%20Area%20Influencia%20Grupo%20EPM%20.pdf](https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Dise%C3%B1o/Anexo%20A-Par%C3%A1metros%20Meteorol%C3%B3gicos%20Area%20Influencia%20Grupo%20EPM%20.pdf)

Erdmann, F., Defer, E., Caumont, O., Blakeslee, R., Pédeboy, S., & Coquillat, S. (2019).

Concurrent Satellite and ground-based Lightning Observations from the Optical Lightning Imaging Sensor (ISS-LIS), the LF network Meteorage and the SAETTA LMA in the northwestern Mediterranean region. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 1–32. <https://doi.org/10.5194/amt-2019-149>

GHRC. (s/f). Lightning Dataset Info—Dataset Links | GHRC Lightning. Recuperado el 21 de octubre de 2021, de [Ghrc.nsstc.nasa.gov](https://ghrc.nsstc.nasa.gov) website:

<https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/dataset-info.html>

Holle, R., Cooper, M. A., & Managing. (2019, julio 21). *Overview of lightning injuries around the world*. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/334600051_Overview_of_Lightning_Injuries_Around_the_World

Icontec. (2008a). *NTC 4552-1 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 1: Principios generales*. Icontec.

Icontec. (2008b). *NTC 4552-1 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 1: Principios generales*. Icontec.

Icontec. (2008c). *NTC 4552-2 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos)*.

Parte 2: Manejo del riesgo. Icontec.

International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC 62305*. International Electrotechnical Commission.

King, H. M. (s/f). World Lightning Strikes Map. Recuperado el 21 de octubre de 2021, de <https://geology.com/articles/lightning-map.shtml>

Laumayer. (s/f). Software de Análisis de riesgo basado en NTC 4552-2 -. Recuperado el 21 de octubre de 2021, de Laumayer website: <https://laumayer.com/software/cirprotec/software-analisis-riesgo-basado-la-ntc-4552-2/>

Ministerio de Minas y Energía. *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE)*. , Pub. L. No. RESOLUCIÓN 9 0708, 211 (2013).

Ortega, H. (s/f). NTC vs IEC: Análisis Comparativo entre las Normas de Protección Contra Rayo: NTC 4552 e IEC 62305, Mediante un Ejemplo Práctico. *patrimonio Cultural*, 10, 3. Recuperado de <http://b-dig.iie.org.mx/BibDig2/P14-0288/PDF/ENERGIA/ABE1433.pdf>

Porras, L. (2016). *Conviviendo con el rayo*. Presentado en Cartagena. Cartagena. Recuperado de <http://www.acofi.edu.co/womel/wp-content/uploads/2016/04/Leonardo-Porras.pdf>

Surtees, A. J., Gillespie, A., Kern, A., & Rousseau, A. (2005). *Development of a risk assessment calculator based on a simplified form of the IEC 62305-2 standard on lightning protection*.

Torres, H., Gallego, L., Salgado, M., Younes, C., Quintana, C., Rondon, D., ... Vargas, M. (2001, enero 1). *Variation of ground stroke density with latitude*. Presentado en Proceedings of SIPDA.

- Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., & Herrera, J. (2015). Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8), 4086–4093. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2428217>
- Torres-Sánchez, H. (2010). ¿Qué rayos sabemos? *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 34(131), 193–208. Recuperado de https://www.accefyn.com/revista/Vol_34/131/193-208.pdf
- Trejos, O. F. G., & Rivera, M. A. P. (2017). *Aplicación android para la evaluación del riesgo eléctrico ante descargas atmosféricas según la norma ntc 4552*. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8958/T005.25%20G463.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trujillo Del Río, D. F. (2018). *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso Colombiano*. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63293>
- Younes-Velosa, C. (2020). Caracterización de parámetros del rayo en Colombia con base en sistemas de localización terrestres y satelitales, 20 años de análisis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173), 960–973. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1171>

9 Anexos

Informe del cálculo de riesgo

CÁLCULO DEL RIESGO SEGÚN NTC 4552-2

Datos Proyecto

Proyecto:

Diseñador:

Dirección:

Telefono

Descripción text3

Dimensiones de la estructura

Longitud de la estructura [m]: 35.0
 Ancho de la estructura [m]: 11.0
 Altura de la estructura [m]: 46.0
 Área total de la estructura [m]: 72909.0

Características de la estructura:

Riesgo de incendio y daños físicos: Normal
 Eficacia del apantallamiento: Media
 Tipo de cableado interno: Apantallado

Influencia ambiental

Situación respecto a los alrededores: Estructura aislada
 Factor ambiental: Urbano
 Densidad anual equivalente de rayos: 0.49516088

Medidas de protección:

Clase de SPCR: Nivel II
 Protección contra incendios: Sistemas manuales
 Protección contra sobretensiones: Solo en entrada de servicios

Líneas de conducción eléctrica:

Línea eléctrica:

Línea que llega a la estructura: Aerea
 Tipo de cable externo: Apantallado
 Existencia de transformador MT/BT: Transformador

Otros servicios aéreos:

Número de servicios conducidos:
 Tipo de cable externo: No apantallado

Otros servicios enterrados:

Número de servicios conducidos:
 Tipo de cable externo: Apantallado

Tipos de las pérdidas:

Tipo 1 - Pérdidas de vidas humanas:

Riesgos especiales para la vida: Nivel alto de pánico
 Por incendios: Iglesias, museos
 Por sobretensiones: Riesgo de explosión

Tipo 2 - Pérdidas de servicios esenciales:

Por incendios: Pérdidas irremplazables
 Por sobretensiones: Apantallado

Tipo 3 - Pérdidas de patrimonio cultural:

Por incendios: Suministro eléctrico

Tipo 4 - Pérdidas económicas:

Riesgos económicos especiales: Riesgos de contaminación
 Por incendios: Oficina, escuela
 Por sobretensiones: Zona agrícola
 Por tensión de paso/contacto: Ganado en el exterior
 Riesgo tolerable de pérd. económ.: 1 en 100 años

Riesgos calculados:

	Riesgo Tolerable Rt	Impacto directo Rd	Impacto indirecto Ri	Riesgo calculado R
Pérdidas de vidas humanas:	1.00e-5	2.918e-02	3.786e-03	3.296e-02
Pérdidas de serv. públicos:	1.00e-3	2.917e-03	3.786e-04	3.296e-03
Pérdidas de patrimonio:	1.00e-3	7.291e-06	7.291e-06	7.539e-06
Pérdidas económicas:	1.00e-3	1.050e-03	1.050e-03	1.113e-03

POTTER VERSION 0.0.8

Este cálculo de riesgo según NTC pretende orientar en el análisis de diversos criterios que determinan el riesgo de pérdidas debidas al rayo. No es posible cubrir todos los elementos especiales de una estructura que puedan hacer que sufra más o menos daños debido al rayo. En casos especiales hay factores económicos y personales que podrían ser muy importantes y considerarse junto con el índice obtenido mediante esta herramienta. Se pretende que este programa se utilice en combinación con la versión escrita de la norma NTC-4552-2

CÁLCULO DEL RIESGO SEGÚN NTC 4552-2

Resultados del área de colección:

Ad - Área de colección de impactos directos a la estructura	72909.0 m2
Nd - número medio de impactos directos a la estructura por año	2.916e-01 flashes/year
Am - Área de colección de la estructura afectada por sobretensiones inducidas por impactos indirectos.	219350.0 m2
Nm - núm. de impactos directos a tierra o a objetos cercanos a la estructura conectados a tierra que inducen sobretensiones	5.858e-01 flashes/year
Ac1 - área de colección de las líneas aéreas a impactos directos.	31032.0 m2
NL1 - número medio de impactos directos por año a las líneas aéreas que sean potencialmente peligrosos	1.241e-01 flashes/year
Ac2 - área de colección de la línea enterrada a impactos directos	18964.0 m2
NL2- número esperado de impactos directos anuales a la línea enterrada que sean potencialmente peligrosos	7.586e-02 flashes/year
Ai2 - área de colección de la línea enterrada a impactos indirectos.	550000 m2
NI2 - número de impactos indirectos anuales a la tierra cercana a la línea enterrada que induzcan sobretensiones peligrosas	2.200e-01 flashes/year

Tipo 1 - Pérdidas de vidas humanas

RA1 - riesgo de tensiones de paso y contacto peligrosas dentro y fuera de la estructura causadas por un impacto directo a la estructura.	2.916e-07
RB1 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a la estructura.	1.458e-05
RC1 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a la estructura.	2.916e-02
RM1 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a la estructura.	5.858e-04
RU1 - riesgo de tensiones de paso y contacto peligrosas dentro y fuera de la estructura causadas por un impacto directo a las líneas.	4.965e-10
RV1 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a las líneas.	4.965e-07
RW1 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a las líneas.	9.930e-04
RZ1 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a las líneas.	2.207e-03

Tipo 2 - Pérdidas de servicios esenciales:

RB2 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a la estructura.	7.291e-07
RC2 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a la estructura.	2.916e-03
RM2 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a la estructura.	5.858e-05
RV2 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a las líneas.	2.483e-08
RW2 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a las líneas.	9.930e-05
RZ2 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a las líneas.	2.207e-04

Tipo 3 - Pérdidas de patrimonio cultural:

RB3 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a la estructura.	7.291e-06
RV3 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a las líneas.	2.483e-07

Tipo 4 - Pérdidas económicas:

RA4 - riesgo de tensiones de paso y contacto peligrosas dentro y fuera de la estructura causadas por un impacto directo a la estructura.	2.916e-05
RB4 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a la estructura.	7.291e-04
RC4 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a la estructura.	2.916e-04
RM4 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a la estructura.	5.858e-06
RU4 - riesgo de tensiones de paso y contacto peligrosas dentro y fuera de la estructura causadas por un impacto directo a las líneas.	4.965e-08
RV4 - riesgo de destrucción debida a incendio, explosión, daños físicos o daños químicos causados por un impacto directo a las líneas.	2.483e-05
RW4 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto directo a las líneas.	9.930e-06
RZ4 - riesgo de fallo de equipos eléctricos o electrónicos debido a sobretensiones causadas por un impacto indirecto a las líneas.	2.207e-05

POTTER VERSION 0.0.8

Este cálculo de riesgo según NTC pretende orientar en el análisis de diversos criterios que determinan el riesgo de pérdidas debidas al rayo. No es posible cubrir todos los elementos especiales de una estructura que puedan hacer que sufra más o menos daños debido al rayo. En casos especiales hay factores económicos y personales que podrían ser muy importantes y considerarse junto con el índice obtenido mediante esta herramienta. Se pretende que este programa se utilice en combinación con la versión escrita de la norma NTC-4552-2