

**METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS DE LÍNEAS  
DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A IMPACTOS INDIRECTOS DE RAYOS EN  
ZONAS MONTAÑOSAS**

**JHON ERNESTO RAMÍREZ BUITRAGO  
JHÓNATAN ANDRÉS HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

**METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS DE LÍNEAS  
DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A IMPACTOS INDIRECTOS DE RAYOS EN  
ZONAS MONTAÑOSAS**

**JHON ERNESTO RAMÍREZ BUITRAGO  
JHÓNATAN ANDRÉS HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electricista**

**DIRECTOR:  
EDISON ANDRÉS SOTO RIOS  
Doctor en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A DIOS y a la VIRGEN MARIA por guiarme en los momentos de felicidad y de tristeza y haberme dado la oportunidad de lograr esta meta que me he propuesto. A mis padres MARGARITA y OCTAVIANO que gracias al apoyo incondicional que me han brindado que podido sobrepasar todas las dificultades que me han sido puestas, por sus enseñanzas que me han brindado durante el transcurso de mi vida.

A mis hermanos Ana, Wilson, Cristina, Juan, Beto, y mis sobrinos, por haberme acompañado durante en este viaje.

### **Jhon Ernesto Ramírez Buitrago**

A mis padres Alicia y Victoriano por ser ejemplo y motivación en cada momento de mi vida, por alentarme a superar dificultades y retos.

A mis hermanos Johnny David y Víctor Manuel por ser pacientes, comprensivos, risueños y un gran apoyo para mí y toda la familia.

A mis parientes y amigos Wendy(x2), Candy, Alejandra, Edgar, Alex, Andrés, y Sergio por sus consejos, sus oraciones y su acompañamiento en el transcurso de la vida.

A Richard y Jose por largas, pero muy alegres horas de trabajo y estudio.

A mis compañeros de la universidad por las experiencias vividas y el trabajo en equipo.

**Sobre todo, a Dios** porque he visto que sus bendiciones han llegado por medio de todos ellos.

**Jhónatan Andrés Hernández Fernández.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad de acceder a la formación académica de alta calidad, de crecer intelectualmente y a los docentes que formaron parte de este proceso.

Al profesor Edison por su dirección en este proyecto. Por permitir el uso del código de Matlab usado en su tesis doctoral para construir el algoritmo en Fortran. Por brindar una base sobre la cual construir el proyecto que se planteó.

A Keraunos, por proporcionar los datos empleados en la construcción del modelo estadístico de incidencias de las descargas atmosféricas a tierra en relación con la altitud.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	19
2.1 ACERCA DEL ESTÁNDAR IEEE 1410 .....	19
2.2 SOBRETENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS.....	21
2.2.1 Modelado de la corriente del rayo.....	22
2.2.2 Cálculo del campo electromagnético. ....	23
2.2.3 Modelos de acople para calcular las tensiones inducidas. ....	24
2.3 FENÓMENO DEL RAYO DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTADÍSTICO.....	25
2.3.1 Densidad de probabilidad. ....	25
2.3.2 Distribución de Probabilidad. ....	26
2.4 ECUACIONES DE MAXWELL.....	26
2.5 MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO .	27
2.6 ACERCA DE LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN .....	34
3. CÓDIGO FDTD-3D EN FORTRAN PARA CÁLCULO DE TENSIONES INDUCIDAS POR RAYO .....	36
3.1 PLATAFORMA DE DESARROLLO UTILIZADA .....	36
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA .....	37
3.2.1 Definición de parámetros y variables. ....	37
3.2.2 Modelamiento del terreno. ....	37
3.2.3 Discretización del terreno.....	38
3.2.4 Campos electromagnéticos y definición de los materiales.....	38

3.2.5 Parámetros para el Conductor delgado. ....	38
3.2.6 Ejecución del método FDTD-3D. ....	38
3.2.7 Resultados. ....	38
3.3 RENDIMIENTO DEL CÓDIGO IMPLEMENTADO, FORTRAN VS MATLAB...40	
3.3.1 Casos de prueba.....	40
4. DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LOS IMPACTOS INDIRECTOS EN ZONAS DE MONTAÑA.....	47
4.1 DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTO PARA HALLAR DDT Y PROBABILIDAD DE LAS DESCARGAS A TIERRA EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.....	48
4.2 SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO. ....	50
4.3 PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LA CANTIDAD DE DESCARGAS OCURRIDAS EN CADA ÁREA.....	52
4.4 ALTURA PROMEDIO DE LAS ZONAS DE ESTUDIO. ....	54
4.5 CÁLCULO DEL PROMEDIO DE LA DDT.....	54
4.6 OBTENCIÓN DEL MODELO DE LA DDT EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD. ....	55
4.6.1 Modelos matemáticos. ....	56
4.7 AJUSTE DE DENSIDAD DESCARGAS A TIERRA DDT (Z) PARA OTRAS ZONAS .....	57
4.8 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS DESCARGAS EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.....	60
5. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN EN SISTEMA MONTAÑOSO.....	66
5.1 AJUSTE PROPUESTO AL PROCEDIMIENTO DEL SDT IEEE 1410-2010 PARA HALLAR ÍNDICE DE FALLAS POR IMPACTOS INDIRECTOS DE RAYOS .....	67
6. CONCLUSIONES .....	73
7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	77

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ecuaciones de Maxwell.....	27
Tabla 2. Ecuaciones suplementarias de Maxwell .....	27
Tabla 3. Tiempo de una simulación Matlab vs Fortran. ....	40
Tabla 4. Coordenadas límites de los datos aportados por la red LINET.....	49
Tabla 5. Coordenadas de las zonas de estudio.....	51
Tabla 6. Total de los eventos en las zonas de estudio. ....	54
Tabla 7. Valores de DDT de referencia.....	59
Tabla 8. Promedio DDT y valores experimentales de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada.....	61
Tabla 9. Probabilidad de impacto de rayos a tierra en relación con la altitud. ....	64

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de inducción de sobretensiones en línea de distribución.....	22
Figura 2. Celda de “Yee” .....	29
Figura 3. Estructura del programa FDTD-3D.....	39
Figura 4. Geometría de análisis 1 .....	41
Figura 5. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 1.....	41
Figura 6. Geometría de análisis 3.....	42
Figura 7. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 3.....	42
Figura 8. Geometría de análisis 4.....	43
Figura 9. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 4.....	43
Figura 10. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 5.....	44
Figura 11. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 6.....	44
Figura 12. Geometría de análisis 7.....	45
Figura 13. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 7.....	45
Figura 14. Localización geográfica las antenas de campo magnético de la red LINET. El rectángulo muestra el área con los datos disponible para el análisis. ...	49
Figura 15. Ubicación geográfica de las zonas de estudio.....	51
Figura 16. Malla generada con la totalidad de los datos de la zona de estudio 1..	53
Figura 17. Promedio de las descargas atmosféricas para la zona de estudio 1. ...	55
Figura 18. Contraste de la DDT en las zonas analizadas .....	56
Figura 19. Valor promedio de los eventos en las dos zonas, superpuestos los modelos analíticos hallados.....	57
Figura 20. Densidad de probabilidad, Distribución de probabilidad acumulada.....	65
Figura 21. Esquema de la metodología propuesta. ....	66
Figura 22. Uso del método electrométrico para determinar las descargas indirectas .....	70
Figura 23. Comparación de la tasa de fallas para diferentes conductividades del suelo y de resistencia a tierra. ....	72

## **LISTA DE ANEXOS**

**“Ver Anexos Adjunto al CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”**

Anexo A. Gráficas del promedio de DDT para cada año en la zona 2

Anexo B. Diagramas de Flujo y ejecutables

## RESUMEN

**TITULO:** METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN FRENTE A IMPACTOS INDIRECTOS DE RAYOS EN ZONAS MONTAÑOSAS.\*

**AUTORES:** JHON ERNESTO RAMÍREZ BUITRAGO, JHÓNATAN ANDRÉS HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** sobretensiones, densidad de descargas a tierra (DDT), rayo, impactos indirectos, función de probabilidad.

### **DESCRIPCIÓN:**

La necesidad de evaluar el desempeño de las líneas de distribución frente a descargas indirectas de rayos en los sistemas montañosos es una de las principales razones para la realización de este proyecto, dado que las normas y estándares no consideran los efectos causados por los terrenos no planos en las tensiones inducidas y a su vez en el desempeño de la línea de distribución. En vista del problema, se propone un procedimiento basado en el estándar IEEE1410 para que estime la tasa de fallas en terrenos no planos. Para el desarrollo del proceso se tomaron en cuenta las siguientes modificaciones: (1) Uso del método FDTD-3D para el cálculo de tensiones inducidas debido a que es posible incluir los efectos del terreno. A partir de un código existente implementado en Matlab se genera un nuevo código en Fortran para reducir el tiempo de las simulaciones. (2) Estimación de la DDT de acuerdo al parámetro topográfico de la altitud. (3) Estimación de la probabilidad de ocurrencias de rayo en función de la altitud. Estas modificaciones desarrolladas a lo largo de este proyecto se articulan en el capítulo 5 con el estándar IEEE 1410-2010, señalando los puntos del método ajustados para su uso en las regiones montañosas. Ofreciendo una propuesta en la que se calcule la tasa de fallas de las líneas de distribución aéreas en los terrenos no planos, permitiendo tomar las precauciones necesarias para fortalecer y mejorar el servicio de energía eléctrica del país.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Edison Andrés Soto Ríos, Doctor en Ingeniería

## ABSTRACT

**TITLE:** METHODOLOGY TO CALCULATE THE FLASHOVER RATE OF DISTRIBUTION LINES AGAINST INDIRECT LIGHTNING STRIKES IN MOUNTAINOUS ZONES.\*

**AUTHORS:** JHON ERNESTO RAMÍREZ BUITRAGO, JHÓNATAN ANDRÉS HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ.\*\*

**KEY WORDS:** overvoltages, ground flash density (GFD), lightning, nearby strokes, probability function.

### DESCRIPTION:

The need to evaluate the performance of the distribution lines against indirect lightning discharges in the mountain systems is one of the main reasons for the realization of this research project, given that the norms and standards do not consider the effects caused by non-flat lands in the induced stresses and in turn in the performance of the distribution line. In view of the problem, a procedure based on the IEEE1410 standard is proposed to estimate the failure rate in non-flat lands. For the development of the process the modifications below were considered: (1) To use the FDTD-3D method for the calculation of induced voltages, because it is possible to include the effects of the terrain. From an existing code implemented in Matlab a new code is generated in Fortran to reduce the time of the simulations. (2) Estimation of the DDT according to the topographic parameter of the altitude. (3) Estimation of the probability of lightning occurrences as a function of altitude. These modifications developed throughout this research project are articulated in chapter 5 with the IEEE1410-2010 standard, indicating the points of the method adjusted for using in mountainous regions. Offering an approach that calculates the failure rate of air distribution lines in non-flat areas, allowing to take the necessary precautions to strengthen and improve the electric power service of the country.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Edison Andrés Soto Ríos, Doctor en Ingeniería

## INTRODUCCIÓN

Las descargas eléctricas atmosféricas causan perturbaciones al sistema eléctrico de distribución por impactos directos e indirectos. Los impactos directos provocan sobretensiones, flameo en los aisladores, aumento del potencial en los equipos y líneas, y en la mayoría de las veces fallas monofásicas<sup>1</sup>. Por otra parte, los impactos indirectos son más frecuentes, su corriente produce intensos campos electromagnéticos los cuales inducen tensiones de grandes magnitudes y de corta duración, provocan fallas en el aislamiento de las líneas de distribución y los equipos que conforman el sistema afectando la continuidad y calidad del servicio<sup>2</sup>.

Se ha comprobado que la magnitud de la tensión inducida se ve influenciada por el tipo de terreno en el que se encuentran ubicadas las líneas de distribución<sup>3,4</sup>, particularmente en los terrenos no planos se evidencia un aumento en el valor de las tensiones inducidas de 3.7 a 5 veces mayor en comparación a las de terrenos planos<sup>5,6,7,8,9</sup>. Sin embargo, la mayoría de los estudios de las tensiones inducidas se han llevado a cabo considerando terrenos planos y han dado origen al estándar IEEE 1410 la cual expone una metodología para cuantificar el desempeño de las líneas de distribución frente a rayos. Dado que el método propuesto en dicho

---

<sup>1</sup> M. Á. Jurado Machado, Análisis del comportamiento de la líneas aéreas de distribución frente al rayo, 2013.

<sup>2</sup> C. A. Nucci y F. Rachidi, «Lightning-Induced Overvoltages,» de IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session, New Orleans, 1999.

<sup>3</sup> D. Li, M. Azadifar, M. Rubinstein, M. Paolone, D. Pavanello, S. Metz, Q. Zhang y Z. Wang, «On Lightning Electromagnetic Field Propagation Along an Irregular Terrain,» IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, vol. 58, nº 1, pp. 161-171, 1 february 2016.

<sup>4</sup> J. E. Soto, E. Pérez y J. Herrera, «Electromagnetic Field Due to Lightning Striking on Top of a Cone-Shaped Mountain Using the FDTD,» IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, nº 5, pp. 1112-1120, 2014.

<sup>5</sup> E. A. Soto Ríos y E. Pérez, «Lightning induced voltages on an distribution network over an inclined terrain,» de 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, 2011.

<sup>6</sup> E. Soto, Estudio de las Tensiones Inducidas por Rayos en Redes de Distribución Aéreas Ubicadas sobre Terrenos no Planos., 2015.

<sup>7</sup> E. Soto, C. Younes y E. Pérez, «Influence of Non Flat Terrain on Lightning Induced Voltage in Distribution Networks,» de International Conference on Lightning Protection (ICLP), Viena, Austria, 2012.

<sup>8</sup> E. A. Soto Ríos, PhD. Thesis "Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non- flat terrains", Manizales, 2014.

<sup>9</sup> S. D. Jiménez Rodríguez, relación entre descargas eléctricas atmosféricas a tierra y fallas en líneas de transmisión y distribución de energía - operador centrales eléctricas de Norte de Santander Colombia, Bogotá, Colombia, 2016.

estándar no es coherente cuando se desea hacer análisis en los sistemas de distribución instalados sobre relieve montañoso, surge la necesidad de plantear una metodología que estime la tasa de fallas provocada por los rayos en terrenos no planos<sup>10</sup>.

Las normas nacionales e internacionales no reflejan la realidad del entorno electromagnético tropical andino, la alta actividad atmosférica (cerca de 8 millones de rayos anuales)<sup>11</sup> en Colombia ocasionan que los efectos de los impactos indirectos provoquen diversos problemas en los sistemas de distribución. Actualmente del 70 al 80% de los problemas por la calidad de la energía se deben a interrupciones y sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas, causando pérdidas económicas de alrededor de 6 millones de dólares anuales<sup>12,13</sup>. Una metodología para calcular la tasa de fallas en terrenos no planos facilitará a los ingenieros la toma de decisiones en cuanto a la operación, seguridad, control, instalación y confiabilidad de los sistemas distribución del país<sup>14</sup>.

Con este trabajo se busca proponer una metodología para calcular el índice de fallas de las líneas de distribución aéreas frente a los impactos indirectos de rayos en los terrenos no planos. Para ello se busca implementar el código FDTD-3D de Matlab a Fortran, desarrollar una fórmula para calcular el valor de la DDT (densidad de descargas a tierra) en función de la altitud, obtener una función de probabilidad de los impactos indirectos en las zonas de montaña y complementar la metodología del estándar IEEE 1410.

---

<sup>10</sup> E. Soto, Estudio de las Tensiones Inducidas por Rayos en Redes de Distribución Aéreas Ubicadas sobre Terrenos no Planos., 2015.

<sup>11</sup> S. D. Jiménez Rodríguez, relación entre descargas eléctricas atmosféricas a tierra y fallas en líneas de transmisión y distribución de energía - operador centrales eléctricas de Norte de Santander Colombia, Bogotá, Colombia, 2016.

<sup>12</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines,» vol. 2010, 2011.

<sup>13</sup> H. Torres, El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Bogotá: UNIBIBLOS, 2002.

<sup>14</sup> A. Faghfour, W. Kinsner y D. Swatek, «Comparison of entropy-based characterization of lightning strike maps using planar and spherical coordinates,» de Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatoon, 2005.

Este trabajo está conformado por seis capítulos. El primer capítulo contiene los objetivos propuestos para este proyecto. El segundo capítulo describe la fundamentación teórica requerida para el desarrollo del proyecto. El tercer capítulo describe las herramientas utilizadas para realizar la traducción de Matlab a Fortran del algoritmo FDTD-3D para el cálculo de las tensiones inducidas. Al final de este capítulo se expone la estructura y el rendimiento del programa. El cuarto capítulo se explica el procedimiento realizado para obtener la fórmula de la DDT en función de la altura y las funciones de probabilidad acumulada y densidad de probabilidad. El quinto capítulo se presenta la metodología propuesta para calcular el índice de fallas de las líneas de distribución aéreas frente a los impactos indirectos en terrenos no planos con la nueva forma para calcular las tensiones inducidas, el cálculo de la DDT y la densidad de probabilidad de los impactos en terrenos no planos. El sexto capítulo se da a conocer las conclusiones de los resultados obtenidos y los trabajos futuros.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Plantear una metodología que permita estimar la tasa de fallas de líneas de distribución aéreas ubicadas sobre zonas de montaña ante impactos indirectos de rayos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar el código (FDTD-3D), en un lenguaje de programación que mejore su rendimiento computacional.
- Determinar la distribución de probabilidad de la ubicación de impactos de rayos en terrenos no planos.
- Adaptar la metodología del estándar IEEE 1410 al cálculo de tasas de fallas de líneas de distribución ubicadas en zona de montaña.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 ACERCA DEL ESTÁNDAR IEEE 1410

En esta guía se considera la metodología para estimar el rendimiento de las líneas de distribución aéreas frente impactos indirectos de rayo en terreno plano. Esta tiene como objetivo proporcionar estimaciones de la cantidad de las fallas provocadas por los rayos y brindar opciones de mejora permitiendo comparar los efectos que producen las descargas atmosféricas frente a otras fuentes de fallas<sup>15,16</sup>.

Para obtener el índice de fallas en las líneas de distribución aéreas ante los impactos indirectos en terrenos planos el estándar IEEE 1410 del 2010, propone la siguiente metodología la cual fue adapta de los estudios realizados por *Alberto Borghetti*<sup>17, 18</sup>.

La metodología se basa en la utilización del método de Montecarlo y el cálculo de la tensión inducida con el código computacional LIOV. Se define este procedimiento por los siguientes pasos.

**Paso 1.** Generación de aleatoriamente una gran cantidad de eventos, cada uno de los eventos cuenta con tres parámetros de incidencia (corriente pico ( $I_p$ ), tiempo de frente ( $t_f$ ) y la distancia de la línea al impacto ( $y$ )), los primeros dos valores siguen

---

<sup>15</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines,» vol. 2010, 2011.

<sup>16</sup> A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone, «An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method,» IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 22, N° 1, pp. 684-692, 2007.

<sup>17</sup> Opcit Institute

<sup>18</sup> Opcit A. Borghetti

una función de probabilidad log-normal, caracterizando la forma del rayo, la distancia de la línea al impacto sigue una distribución uniforme<sup>19,20</sup>.

**Paso 2.** Se halla el valor de la tensión inducida para cada impacto indirecto, para realizar el cálculo de las tensiones inducidas se utiliza el código computacional LIOV que<sup>21,22</sup>

**Paso 3.** Se considera falla cuando los eventos presenten valores tensiones inducidas mayores al CFO.

$$F_p = 200 \frac{n}{n_{tot}} N_g y_{m\acute{a}x} \quad (0.1)$$
$$N_g = 0.0017 T_d^{1.56}$$

Dónde

$F_p$ : es el número de descargas disruptivas debidas a tensiones inducidas por rayos en 100 km de línea de distribución por año.

$N_g$ : es la densidad de descargas a tierra (rayo /km<sup>2</sup> año)

$y_{m\acute{a}x}$ : distancia en la que se considera que los efectos de los impactos no son significativos.

$n_{tot}$  : es el número total de flashes considerados en la zona de  $\pm y_{m\acute{a}x}$ .

$T_d$  : Número de días tormentosos al año.

Una de las consideraciones tomadas consiste en tomar el nivel cerámico de la zona, para estimar densidad de rayos a tierra. Debido a la gran incertidumbre que el método conlleva, se recomienda analizar otros parámetros, como la altitud, para la determinación de la DDT y la probabilidad de ocurrencia de impactos mediante el desarrollo de modelos<sup>23</sup>.

---

<sup>19</sup> Ibid

<sup>20</sup> Ibid

<sup>21</sup> Opcit Institute

<sup>22</sup> Opcit A. Borghetti

<sup>23</sup> Opcit Institute

En el quinto capítulo se explica con mayor detalle la metodología del estándar IEEE 1410 incluyéndose los ajustes propuestos en este proyecto.

## 2.2 SOBRETENSIONES INDUCIDAS POR RAYOS

Es un transitorio de tensión generado por un campo electromagnético que es provocado por una descarga nube a tierra cerca de las líneas de distribución<sup>24</sup>. Estas sobretensiones tienen una duración muy corta y una amplitud muy grande, que puede ser varias veces la tensión máxima nominal<sup>25</sup>. La magnitud y la forma onda de la tensión inducida depende de la descarga del retorno del rayo, de la distancia, la posición relativa con respecto a la línea de distribución, de los parámetros eléctricos de la línea y las configuraciones de esta<sup>26</sup>.

Los primeros estudios acerca de las sobretensiones en los sistemas eléctricos señalaban que la inducción electrostática era generada por las nubes de tormenta, sin embargo, el avance en las investigaciones ha llevado a la realización de modelos cada vez más complejos y realistas, en el cual se describen a las tensiones inducidas por el campo producido por la corriente del canal del rayo, siendo la componente principal en el efecto de la inducción de las líneas aéreas. No obstante, la mayoría de los métodos propuestos adoptan las siguientes pautas para hallar las sobretensiones inducidas, en la Figura 2.1 se muestra el proceso de generación de tensión inducida:

1. Modelamiento de la corriente del rayo, primera descarga del retorno (Color rojo de la Figura 1).
2. Cálculo del campo electromagnético generado por la corriente del rayo ( $\vec{E}, \vec{B}$ ).
3. Calcular la tensiones en la línea de distribución usando el modelo de acople.

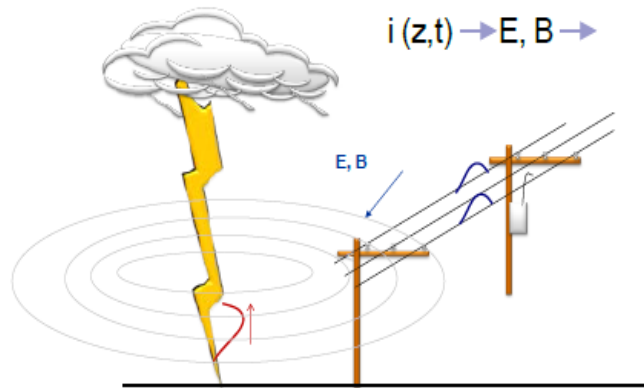
---

<sup>24</sup> Opcit C. A. Nucci y F. Rachidi

<sup>25</sup> Opcit. M. Á. Jurado Machado

<sup>26</sup> Opcit C. A. Nucci y F. Rachidi

Figura 1. Esquema de inducción de sobretensiones en línea de distribución.



Fuente: A. Faghfour, W. Kinsner y D. Swatek,

**2.2.1 Modelado de la corriente del rayo.** Los modelos que describen la distribución en el espacio y en el tiempo de la corriente dentro del canal del rayo son:

**Modelo de línea de transmisión (TL):** la descarga del retorno se presenta como un pulso de corriente de va desde el suelo hasta la nube sin perder la forma y amplitud de la onda, la ecuación (0.2) describe este comportamiento<sup>27</sup>.

$$i(z', t) = i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \quad z' \leq v \cdot t \quad (0.2)$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' > v \cdot t$$

Donde:

$z'$ : longitud de la tierra a la nube

$v$ : velocidad de la descarga de retorno.

$t$ : tiempo.

<sup>27</sup> E. P. González, avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución, Bogotá D.C, Colombia, 2006.

**Modelo modificado de la línea de transmisión (MTL):** se comporta de forma similar al modelo TL la diferencia consiste en que la magnitud de la corriente disminuye a medida que se propaga por el canal de descarga, considerando que se pierde parte de carga eléctrica en el retorno del rayo a la nube, la ecuación (0.3) describe el comportamiento de la corriente a lo largo del canal de descarga<sup>28</sup>.

$$\begin{aligned} i(z', t) &= e^{-\frac{z'}{\lambda}} i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) & z' \leq v \cdot t \\ i(z', t) &= 0 & z' > v \cdot t \end{aligned} \quad (0.3)$$

Donde.

$z'$ : longitud de la tierra a la nube

$\lambda$ : constante de decaimiento

$v$ : velocidad de la descarga de retorno.

$t$ : tiempo.

**2.2.2 Cálculo del campo electromagnético.** Con la caracterización de la corriente de la descarga de retorno es posible calcular el campo electromagnético usando algunas técnicas de análisis que están basadas en las ecuaciones de Maxwell, estas son:

1. Técnicas analíticas:

Método del monopolo utiliza las ecuaciones de continuidad, en especial la de densidad de carga y de corriente.

Método del dipolo usa la condición de Lorentz y requiere únicamente la densidad de corriente.

---

<sup>28</sup> Opcit E. P. González

Transformación matemática para la cual la densidad de las cargas interactúa con los retardos de la corriente<sup>29</sup>. Estos métodos no se tienen en cuenta para este proyecto puesto que considera terreno plano y perfectamente conductor.

2. Técnicas numéricas: la solución de las ecuaciones de Maxwell se hace en el dominio del tiempo, los métodos más conocidos son:

Método de momentos finitos (MOM).

Método de elementos finitos (FEM).

Método de diferencias finitas en el tiempo (FDTD).

**2.2.3 Modelos de acople para calcular las tensiones inducidas.** Para realizar el cálculo de las tensiones se utiliza el método de las aproximaciones de las líneas de distribución como fuentes distribuidas. Este método propone que la dimensión de la sección transversal de la línea es eléctricamente pequeña logrando así que la propagación se de en el eje de la línea. Con base en esto se han hecho diferentes estudios llegando a proponer diferentes modelos de acople siendo uno de los primeros el método de Rucsk, en el cual se desprecia la conductividad del terreno y las pérdidas en el conductor, actualmente este modelo es muy usado pero está limitado a redes de distribución de poca complejidad<sup>30,31</sup>.

Posteriormente Agrawal expresa un modelo en cual se relacionan la tensión dispersa y la corriente total inducida, considerando como única fuente de inducción el campo eléctrico horizontal<sup>32</sup>.

---

<sup>29</sup> S. D. Jiménez Rodríguez, relación entre descargas eléctricas atmosféricas a tierra y fallas en líneas de transmisión y distribución de energía - operador centrales eléctricas de norte de Santander Colombia, Bogotá, Colombia, 2016.

<sup>30</sup> E. A. Soto Ríos, PhD. Thesis "Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non- flat terrains", Manizales, 2014

<sup>31</sup> Opcit. E. P. González

<sup>32</sup> Ibíd.

## 2.3 FENÓMENO DEL RAYO DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTADÍSTICO.

El fenómeno del rayo desde el punto de vista estadístico. Por definición la estadística es una “rama de la matemática que utiliza grandes conjuntos de datos numéricos para obtener inferencias basadas en el cálculo de la razón entre el número de casos favorables y el número de casos posibles en un proceso aleatorio”<sup>33</sup>. Partiendo de esta definición se asume que el estudio de las descargas atmosféricas se puede abordar desde la estadística debido a la aleatoriedad del fenómeno en estudio. Actualmente se utilizan herramientas estadísticas y de probabilidad para el estudio de sus parámetros que también pueden variar de acuerdo con la región geográfica. La mayoría de los estudios e investigaciones han sido realizados a zonas semi-tropicales y templadas dejando aún mucho por investigar sobre el fenómeno en Colombia que se encuentra ubicada en zona tropical<sup>34</sup>. En aras de cumplir los objetivos del proyecto, se busca establecer una relación entre la cantidad de ocurrencias de rayos nube tierra y la altura sobre el nivel del mar en Colombia. Esta información se puede enmarcar en los conceptos de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad.

**2.3.1 Densidad de probabilidad.** La función densidad de probabilidad<sup>35</sup> describe la probabilidad relativa o la frecuencia en la que una variable aleatoria se produzca en un valor del parámetro dado<sup>36</sup>. Matemáticamente, una función  $f$  que describa la densidad de probabilidad debe cumplir con la ecuación (0.4) y (0.5).

$$f(x) \geq 0 \text{ para toda } x \quad (0.4)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (0.5)$$

---

<sup>33</sup> Real Academia Española, «<http://dle.rae.es>,» © Real Academia Española., 2018. [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/?id=GjpDTiC>. [Último acceso: 2018 07 25].

<sup>34</sup> H. Torres, El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Bogotá: UNIBIBLOS, 2002.

<sup>35</sup> PDF, Por sus siglas en inglés (*Probability Density Function*).

<sup>36</sup> Manufacturing Terms, «Manufacturing Terms, Definition at a click away,» Manufacturing Terms, [En línea]. Available: <https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Probability-Density-Function.html>. [Último acceso: 25 07 2018].

**2.3.2 Distribución de Probabilidad.** En una distribución de probabilidad se representan todos los valores resultados de un experimento si éste se hiciese, es decir, la probabilidad de que un evento se realice en el futuro. Esta constituye una herramienta fundamental para la predicción, puesto que se puede diseñar un escenario de acontecimientos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos naturales<sup>37</sup>.

Formalmente, una función de distribución acumulada se define de la siguiente forma<sup>38</sup>. Siendo “*f*” la función densidad de probabilidad de la variable aleatoria “*z*”.

De esta forma la probabilidad “*P*” de un suceso “*X*” en un intervalo (*z*<sub>1</sub>, *z*<sub>2</sub>) de la variable parámetro “*x*” está dado por:

$$P(z_1 \leq X \leq z_2) = \int_{z_1}^{z_2} f(x) dx = F(z_2) - F(z_1) \quad (0.6)$$

Si *z*<sub>1</sub> y *z*<sub>2</sub> son los valores de los extremos del parámetro a analizarse, en consonancia con la ecuación (0.6) se tiene que:

$$P(z_{\text{mínimo}} \leq X \leq z_{\text{máximo}}) = 1 \quad (0.7)$$

## 2.4 ECUACIONES DE MAXWELL

Formuladas por James Clerk Maxwell en 1865, estas ecuaciones describen el comportamiento macroscópico del electromagnetismo. Son una síntesis de estudios anteriores hechos por Charles-Augustin de Coulomb, Friedrich Gauss, Heinrich Lenz, Joseph Henry, Michael Faraday, André-Marie Ampère, que dedujeron las leyes del electromagnetismo mediante la experimentación. Años más tarde, Oliver

---

<sup>37</sup> K. L. Monti, «Folded Empirical Distribution Function Curves-Mountain Plots,» The American Statistician, vol. 49, nº 4, pp. 342-345, Noviembre 1995.

<sup>38</sup> *Ibíd.*

Heaviside y Heinrich Rudolf Hertz reformularon ecuaciones en forma más compacta mediante el uso de del análisis vectorial, como las conocemos actualmente<sup>39</sup>.

Tabla 1. Ecuaciones de Maxwell

Descripción	Forma Diferencial	Forma Integral
Ley de Ampère generalizada	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \int_S \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$
Ley de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$
Ley de Gauss	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_e$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon} = \phi_E$
Ley de Gauss para el campo magnético	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \rho_m = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

Nota: Adaptado E. A. Soto Ríos, PhD. Thesis, S. D. Jiménez Rodríguez,

Tabla 2. Ecuaciones suplementarias de Maxwell

Variables	Ecuación-valor	Unidades	Descripción
$\vec{D}$	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	(C/m <sup>2</sup> )	Densidad de campo eléctrico.
$\vec{B}$	$\vec{B} = \mu(\vec{H} + \vec{M})$	(Wb/m <sup>2</sup> )	Densidad de flujo magnético.
$\vec{M}$	-	(V/m <sup>2</sup> )	Densidad de corriente Magnética
$\mu$	$\mu = \mu_r \mu_0$	(H/m)	Permeabilidad Magnética.
$\epsilon$	$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$	(F/m)	Permitividad Eléctrica.
$\mu_r$	-	-	Permeabilidad Magnética relativa.
$\epsilon_r$	-	-	Permitividad eléctrica relativa.
$\mu_0$	$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$	(H/m)	Permeabilidad magnética del vacío.
$\epsilon_0$	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9}$	(F/m)	Permitividad Eléctrica del vacío.
$q$	-	(C)	Carga eléctrica.
$\phi_E$	-	(N·m <sup>2</sup> /C)	Flujo de campo.

Nota: Adaptado de E. Atef Z. y V. Demir, The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB

## 2.5 MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Es una técnica concebida originalmente para solucionar las ecuaciones de Maxwell y los problemas electromagnéticos con condiciones de frontera finitas. La solución

<sup>39</sup> P. Gómez y E. González, Las ecuaciones de Maxwell.

de este método se realiza mediante la implementación de un algoritmo que reemplace las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones finitas en las cuales se eligen los puntos de evaluación de los campos electromagnéticos en la región tridimensional de interés. La formulación se basa en discretizar el espacio y el tiempo de forma estructurada y regularmente espaciada<sup>40, 41</sup>.

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$$

Donde:

$\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  son los incrementos espaciales.

Cada función dependiente del espacio y del tiempo se describe como:

$$F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k)$$

Con  $\Delta t$  el intervalo de tiempo. Las derivadas espacio temporales de la función se desarrollan usando diferencias finitas centradas evaluadas en celdas solapadas en las ecuaciones (0.8) y (0.9).

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) - F^n\left(i - \frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta x} \quad (0.8)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (0.9)$$

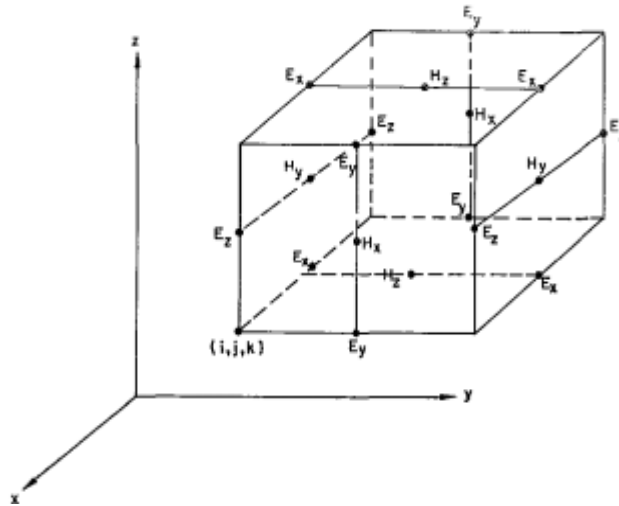
La celda Yee mostrada en la ecuación se utiliza para evaluar el campo  $E$  y  $H$  en el espacio.

---

<sup>40</sup> E. Atef Z. y V. Demir, The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB (R) Simulations, United States of America: SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC, 2008.

<sup>41</sup> K. S. Yee, «Numerical Solution of initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media,» IEEE Transactions On Antennas and Propagation, pp. 302-307, 1966.

Figura 2. Celda de "Yee"



Fuente: Tomado de K. S. Yee, «Numerical Solution of initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media,»

Gracias a su facilidad de programación, su formulación y la precisión de sus cálculos, actualmente se han favorecido el progreso de los modelos en el dominio del tiempo debido al creciente desarrollo de los recursos computacionales, lo que ha generado que este método sea la técnica más atractiva de electromagnetismo computacional para muchos dispositivos de microondas, aplicaciones de antenas, y además, el estudio de descargas atmosféricas, donde se puede incluir los efectos del terreno<sup>42</sup>. Para el estudio de las descargas atmosféricas con este modelo se debe tener en consideración el canal del rayo y los campos eléctricos y magnéticos<sup>43</sup>. De este modo la corriente en cada punto del espacio tiene en cuenta las definiciones de la base del canal del rayo y los modelos de la descarga de retorno de la descarga atmosférica. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los campos eléctricos y magnéticos son:

---

<sup>42</sup> Opcit. E. A. Soto Ríos, PhD

<sup>43</sup> Ibíd.

1. Ecuación del campo eléctrico  $E_x$ .

$$\begin{aligned}
 E_x^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\epsilon_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x(i, j, k)}{2\epsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k)} * E_x^n(i, j, k) \\
 &+ \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))\Delta y} \\
 &* (H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - 1, k)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))\Delta z} \\
 &* (H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - 1)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))} * \zeta_{ix}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{0.10}$$

2. Ecuación del campo eléctrico  $E_y$ .

$$\begin{aligned}
 E_y^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\epsilon_y(i, j, k) - \Delta t\sigma_y(i, j, k)}{2\epsilon_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k)} * E_y^n(i, j, k) \\
 &+ \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))\Delta z} \\
 &* (H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - 1)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))\Delta x} \\
 &* (H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i - 1, j, k)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))} * \zeta_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{0.11}$$

3. Ecuación del campo eléctrico  $E_z$ .

$$\begin{aligned}
 E_z^{n+1}(i, j, k) &= \frac{2\epsilon_z(i, j, k) - \Delta t\sigma_z(i, j, k)}{2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k)} * E_z^n(i, j, k) \\
 &+ \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))\Delta x} * (H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 &- H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))\Delta y} * (H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 &- H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))} \\
 &* \zeta_{iy}^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{0.12}$$

4. Ecuación del campo magnético  $H_x$ .

$$\begin{aligned}
 H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_x(i, j, k) - \Delta t\sigma_x(i, j, k)}{2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k)} * H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 &+ \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))\Delta z} * (E_z^n(i, j, k+1) \\
 &- E_z^n(i, j, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))\Delta y} \\
 &* (E_y^n(i, j+1, k) - E_y^n(i, j, k)) \\
 &- \frac{2\Delta t}{(2\mu_x(i, j, k) + \Delta t\sigma_x(i, j, k))} * M_{ix}^n(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{0.13}$$

5. Ecuación del campo magnético  $H_y$ .

$$\begin{aligned}
H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_y(i, j, k) - \Delta t\sigma_y(i, j, k)}{2\mu_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k)} * H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
&+ \frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))\Delta z} * (E_z^n(i+1, j, k) \\
&- E_z^n(i, j, k)) - \frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))\Delta y} \\
&* (E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)) \\
&- \frac{2\Delta t}{(2\mu_y(i, j, k) + \Delta t\sigma_y(i, j, k))} * M_{iy}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{0.14}$$

6. Ecuación del campo magnético  $H_z$  es:

$$\begin{aligned}
H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) &= \frac{2\mu_z(i, j, k) - \Delta t\sigma_z(i, j, k)}{2\mu_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k)} * H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
&+ \frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))\Delta z} \\
&* (E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)) \\
&- \frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))\Delta y} \\
&* (E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)) \\
&- \frac{2\Delta t}{(2\mu_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k))} * M_{iz}^n(i, j, k)
\end{aligned} \tag{0.15}$$

Las anteriores ecuaciones fueron adaptadas de. [8]

Donde:

$\zeta_{iu}$ : Densidad de corriente eléctrica en dirección del eje  $u$ .

$M_{iu}$ : Densidad de corriente magnética en dirección del eje  $u$ .

$\epsilon_u$ : Permitividad en la dirección  $u$ .

$\sigma_u$ : conductividad en la dirección u.

$\Delta t$ : incremento del tiempo.

La dirección u puede tomar los valores de x, y, z.

El canal del rayo es modelado como una matriz de fuentes de corrientes. El valor de la corriente en cada punto del espacio está dado por una corriente de base de canal definida y un modelo de carrera de retorno definido en la ecuación (0.2) y (0.3). La ecuación del campo eléctrico que modela el comportamiento del canal del rayo es:

$$\begin{aligned}
 E_z^{n+1}(i, j, k) = & \frac{2\epsilon_z(i, j, k) - \Delta t\sigma_z(i, j, k) - \frac{\Delta t\Delta z}{R_s\Delta x\Delta y}}{2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k) + \frac{\Delta t\Delta z}{R_s\Delta x\Delta y}} * E_z^n(i, j, k) \\
 & + \frac{2\Delta t}{\left(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k) + \frac{\Delta t\Delta z}{R_s\Delta x\Delta y}\right) \Delta x} * (H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 & - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1, j, k)) \\
 & - \frac{2\Delta t}{\left(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k) + \frac{\Delta t\Delta z}{R_s\Delta x\Delta y}\right) \Delta y} * (H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \\
 & - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1, k)) \\
 & - \frac{2\Delta t}{\left(2\epsilon_z(i, j, k) + \Delta t\sigma_z(i, j, k) + \frac{\Delta t\Delta z}{R_s\Delta x\Delta y}\right) \Delta x\Delta y} * I_s^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{0.16}$$

Donde:

$R_s$ : Resistencia interna de la fuente.

$I_s$ : Corriente del rayo.

$\epsilon_u$ : Permitividad en la dirección u.

$\sigma_u$ : conductividad en la dirección u.

$\Delta t$ : incremento del tiempo.

## 2.6 ACERCA DE LOS LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

Dado que uno de los objetivos del presente proyecto consistió en mejorar el rendimiento de un código computacional, mediante el cambio de sintaxis para adaptarlo a otro lenguaje de programación, fue necesario realizar consultas previas para contrastar el desempeño de los diferentes lenguajes.

- C++. Es un lenguaje de programación creado a partir de C con el fin de extender las funcionalidades, permitiendo la manipulación de objetos. Es potente y flexible cuando se requiere la creación de sistemas complejos, y en la compatibilidad que tienen con todos los sistemas operativos. Su mayor desventaja radica en su compleja sintaxis<sup>44</sup>.
- Python. Es usado para añadir flexibilidad a las aplicaciones como análisis de datos o animación gráfica. Se ejecuta alrededor de 44 veces más lento que en C ++, Pero gracias a la librería numba permite acelerar los código **Python a velocidades cercanas a las de C++** con tan sólo un par de líneas más en su código<sup>45</sup>.
- Fortran. Lenguaje de propósitos generales de programación imperativa especialmente desarrollado para el cálculo numérico y científico. Ha dominado el área de programación y ha sido usado continuamente en áreas como física computacional, química computacional, análisis finito de elementos y predicción numérica del clima. Es usual su uso en la computación de alto rendimiento<sup>46</sup>.

C++ y Fortran son todavía considerablemente más rápidos que cualquier otra alternativa, en comparación con estos lenguajes de alto nivel; MATLAB es entre 9

---

<sup>44</sup> Universidad Internacional de Valencia, «universidadviu.» 21 01 2017. [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.es/lenguaje-alto-nivel-los-mas-utilizados/>. [Último acceso: 15 10 2017].

<sup>45</sup> T. Radcliffe, «activestate.com,» 01 09 2016. [En línea]. Available: <https://www.activestate.com/blog/2016/09/python-vs-cc-embedded-systems>. [Último acceso: 15 10 2017].

<sup>46</sup> J. Backus, «THE HISTORY OF FORTRAN I, II, AND III,» de Fortran Session, 2014.

a 11 veces más lento que el mejor ejecutable de C ++ y que Fortran. Sin embargo, cuando se combina con archivos Mex, la diferencia es sólo de 1,24 a 1,64 veces<sup>47</sup>. Particularmente en la evolución de Fortran se ha incluido la aritmética de números complejos, lo cual amplía la gama de aplicaciones para las que el lenguaje se adapta; adicionalmente a las técnicas de compilación que han sido creadas para mejorar la calidad del código máquina generado<sup>48</sup>. Por su rendimiento y las ventajas anteriormente mencionadas, la implementación del código se realizó en Fortran<sup>49,50</sup>

51 .

---

<sup>47</sup> J. Kinlay , «jonathankinlay.com,» 24 02 2015. [En línea]. Available: <http://jonathankinlay.com/2015/02/comparison-programming-languages/>. [Último acceso: 15 10 2017].

<sup>48</sup> H. C. M. S. Cruz, Programando en Fortran, 2007.

<sup>49</sup> D. M. SULLIVAN, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, Piscataway: IEEE Press Wiley, 2013.

<sup>50</sup> U. O. d. Catalunya, «<http://informatica.blogs.uoc.edu>,» 24 10 2011. [En línea]. Available: <http://informatica.blogs.uoc.edu/2011/10/24/el-lenguaje-de-programacion-mas-eficiente/>. [Último acceso: 15 10 2017].

<sup>51</sup> E. Ioh, «The ideal HPC,» acmqueve, 2010.

### **3. CÓDIGO FDTD-3D EN FORTRAN PARA CÁLCULO DE TENSIONES INDUCIDAS POR RAYO**

El método FDTD es el procedimiento más utilizado para calcular las tensiones inducidas y los campos electromagnéticos en las líneas de distribución debido a la posibilidad de incluir la topología del terreno<sup>52</sup>. Para realizar los cálculos necesarios el algoritmo FDTD-3D sigue un conjunto de pasos y operaciones en un determinado lenguaje de programación. El Doctor Edison Soto implementó en Matlab el método para calcular las tensiones inducidas provocadas por rayos, pero las limitaciones de capacidad de cómputo requieren implementar el código en un lenguaje de programación que facilite la sintaxis del código, aumentando el rendimiento computacional. Para la implementación del código FDTD-3D se seleccionó el lenguaje de programación de alto nivel FORTRAN. Téngase en cuenta que al algoritmo no se le realizaron modificaciones a su estructura, únicamente se cambió la sintaxis de los códigos fuente para compilar la solución en dicho lenguaje. En este capítulo se presenta una breve descripción del algoritmo y en la última sección de este capítulo se presenta una comparación del tiempo de cálculo usando Matlab versus el ejecutable construido en Fortran.

#### **3.1 PLATAFORMA DE DESARROLLO UTILIZADA**

Visual Studio 2017, Intel Parallel Studio 2018. Es un software de desarrollo integrado altamente compatible con gran variedad de lenguajes de programación, sus herramientas de desarrollo están disponibles para plataformas Windows y Macintosh. Visual Studio es una poderosa herramienta para crear y mantener archivos fuente de programas. Es sensible al lenguaje fuente y mostrará palabras clave y comentarios en diferentes textos de colores, haciéndolos más fáciles de

---

<sup>52</sup> Opcit E. A. Soto Ríos, PhD.

distinguir en su código fuente. Las funciones básicas de edición están disponibles como comandos de menú y generalmente hay más de una forma de iniciar cualquier comando. Sin embargo, a pesar de su gran compatibilidad con múltiples lenguajes no cuenta con compilador de Fortran lo que hace necesario usar *Intel Parallel Studio* que se incorpora fácilmente al entorno de *Visual Studio*<sup>53</sup>.

## 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa para calcular las tensiones inducidas es un código implementado que permite obtener los campos electromagnéticos y las tensiones inducidas, provocadas por los impactos indirectos cercanos a las líneas de distribución en diferentes terrenos montañosos.

El programa FDTD-3D utiliza un método de programación modular con estructura jerárquica que permite crear módulos programables mediante la descomposición en programas más simples, llamados subprogramas o subrutinas. Mediante este método se podrá comprender fácilmente el programa y realizar ajustes que se requieran con mayor facilidad.<sup>54,55</sup>. Siguiendo este principio el código dispone de la siguiente estructura.

**3.2.1 Definición de parámetros y variables.** Definen parámetros del rayo, geometría del terreno, constantes físicas que involucran el fenómeno, parámetros de la línea y el modelo de la descarga.

**3.2.2 Modelamiento del terreno.** Crea un terreno en tres dimensiones (X, Y, Z) dependiendo del tipo que se desea. En este caso se puede escoger varios tipos de geometrías que representan diversas formas del relieve.

---

<sup>53</sup> intel.com, «software.intel.com,» [En línea]. Available: <https://software.intel.com/en-us/get-started-with-fortran-compiler-18.0-for-windows-parallel-studio-xe-2018>. [Último acceso: 7 11 2018].

<sup>54</sup> H. C. M. S. Cruz, Programando en Fortran, 2007.

<sup>55</sup> Scitools, «ScitoolsUnderstand,» scitools, 2017. [En línea]. Available: <https://scitools.com/trial-download-3/>.

**3.2.3 Discretización del terreno.** Se discretiza el terreno en tres dimensiones, se realiza para cada una de las posiciones a lo largo del eje X y Y, por medio del algoritmos staircase dándole las propiedades magnéticas al terreno.

**3.2.4 Campos electromagnéticos y definición de los materiales.** Define las matrices de los campos electromagnéticos en coordenadas rectangulares mediante el uso de las ecuaciones de Maxwell y define los parámetros de conductor (PEC) y del aire. Tiene la particularidad que el radio del conductor que se desea representar es más pequeño que el tamaño de las celdas usadas en la discretización del método de Yee.

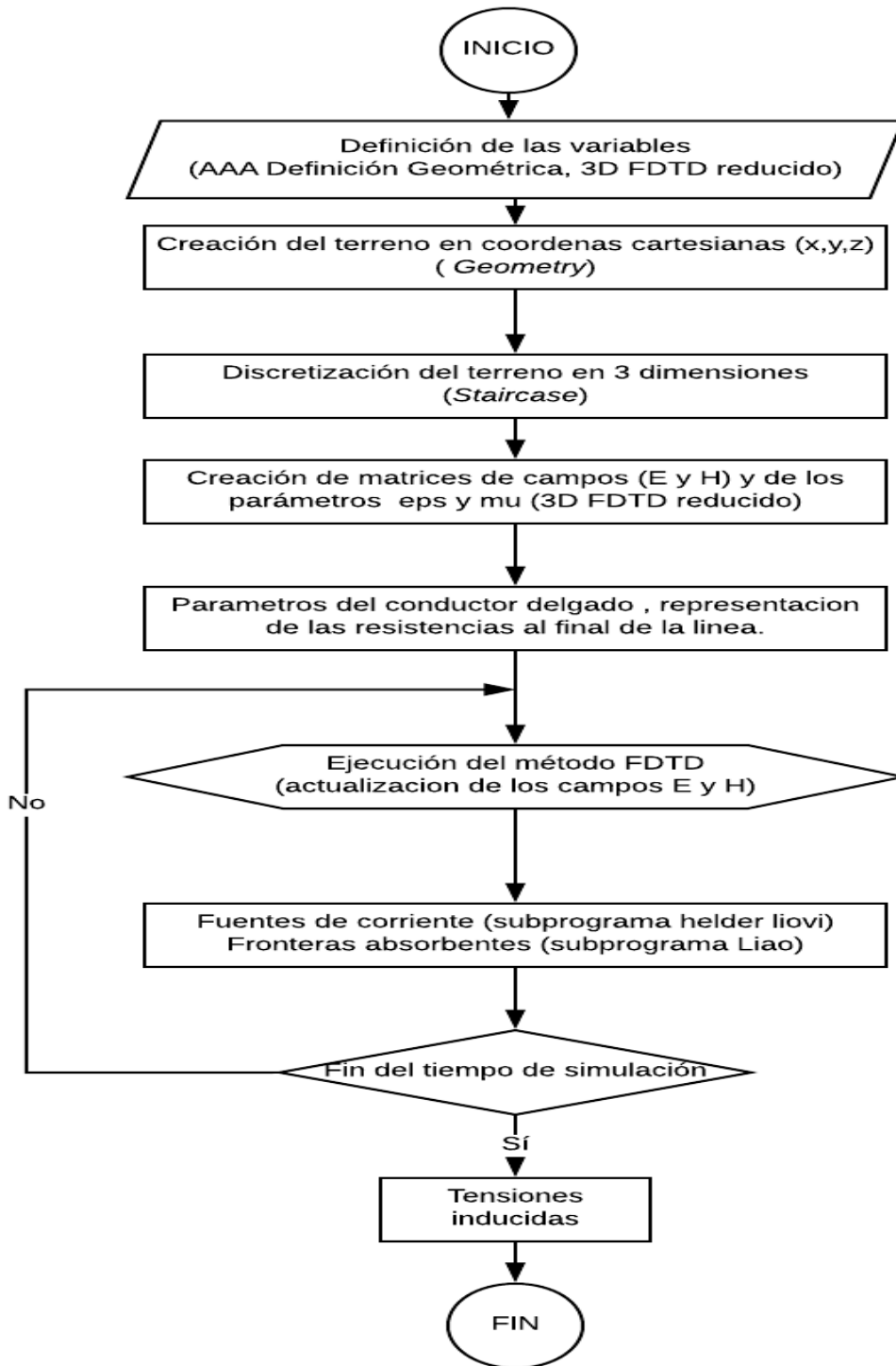
**3.2.5 Parámetros para el Conductor delgado.** Se utiliza la técnica del conductor delgado en el método FDTD para representar líneas uniformes y no uniformes, con el objetivo de obligar que el campo eléctrico en el conductor sea cero.

**3.2.6 Ejecución del método FDTD-3D.** Realiza la actualización de los campos electromagnéticos, calcula un vector de corrientes de fuente o corriente producida por el impacto indirecto del rayo, adiciona condiciones de frontera absorbentes (LIAO) con el fin de limitar el espacio computacional para cada instante de tiempo.

**3.2.7 Resultados.** Se obtienen los valores de las tensiones inducidas para cada geografía.

En la figura 3. Se muestra el diagrama de flujo con la estructura básica del código FDTD-3D, para conocer en detalle el algoritmo completo revisar los diagramas de flujo anexos en el CD.

Figura 3. Estructura del programa FDTD-3D.



### 3.3 RENDIMIENTO DEL CÓDIGO IMPLEMENTADO, FORTRAN VS MATLAB.

Se encontró que para un mismo algoritmo implementado en Fortran y en Matlab, el primero es cerca de nueve veces más rápido<sup>56</sup>. En la tabla 3. Se muestran los resultados de un único evento simulado para Matlab y el ejecutable compilado desde Fortran. Es evidente que a mayor complejidad de la geometría del terreno el tiempo de la simulación aumenta. Considerando que el procedimiento propuesto en la guía IEEE1410 para hallar la tasa de fallas requiere de aproximadamente de 20 mil simulaciones de incidencia de rayo, la reducción en el tiempo de las tensiones inducidas es significativa. Usando los códigos de Matlab en un computador personal las simulaciones se llevan a cabo en cerca de 42 días mientras que usando el algoritmo creado en Fortran se espera la simulación tome alrededor de 5 días.

Tabla 3. Tiempo de una simulación Matlab vs Fortran.

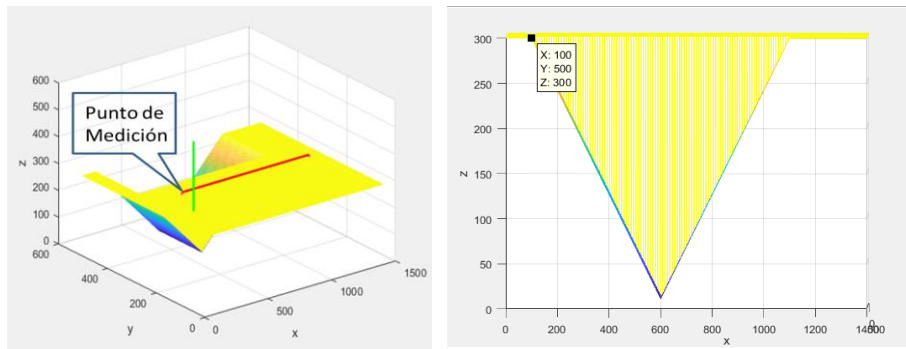
Geometría	Tiempo Matlab [mm.ss.ms]	Tiempo de fortran [mm.ss.ms]	Proporción ( $t_{matlab}/t_{fortran}$ )
GEOM 1	04.03.520	00.30.450	8,00
GEOM 3	01.30.010	00.09.400	9,58
GEOM 4	02.16.500	00.14.220	9,60
GEOM 5	03.54.890	00.30.400	7,73
GEOM 6	02.18.330	00.14.550	9,83
GEOM 7	04.42.090	00.34.070	8,16

**3.3.1 Casos de prueba.** La forma de verificación del código consiste en ejecutar el algoritmo en Matlab y Fortran para algunas representaciones de terreno y comparar los valores de las tensiones inducidas por cada código. Las tensiones fueron calculadas en el extremo más cercano de la línea al punto de impacto, en las figuras correspondientes a cada geometría se señala el punto de medición, el conductor de la línea y el canal del rayo con color rojo y verde respectivamente.

<sup>56</sup> J. Kinlay «jonathankinlay.com,» 24 02 2015. [En línea]. Available: <http://jonathankinlay.com/2015/02/comparison-programming-languages/>. [Último acceso: 15 10 2017].

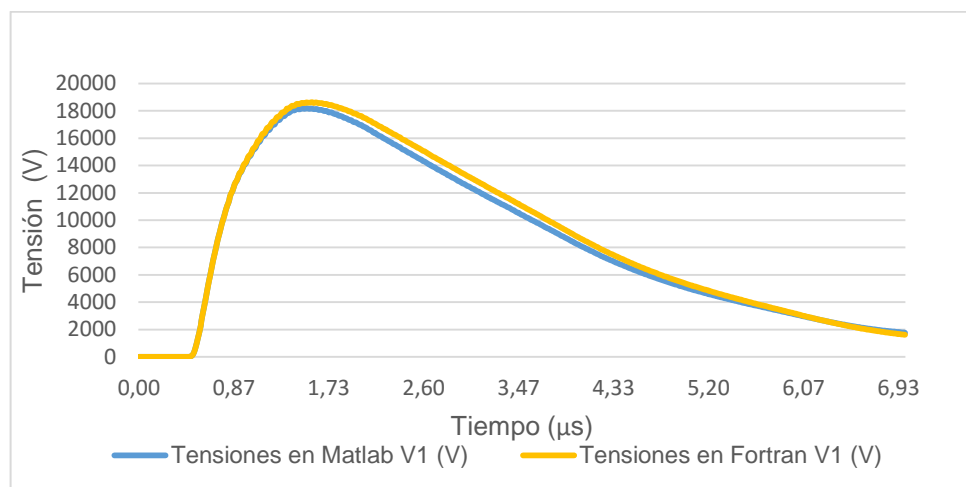
**Geometría 1.** Modelo de relieve para dos laderas convergentes y un acantilado transversal. En la figura 4. Se muestra un terreno plano con la particularidad de que interrumpe la planicie con dos laderas y un acantilado. La pendiente de las laderas del cañón es de 0.55 que corresponde a un ángulo de inclinación a  $29^\circ$ .

Figura 4. Geometría de análisis 1



En la figura 5 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 1.

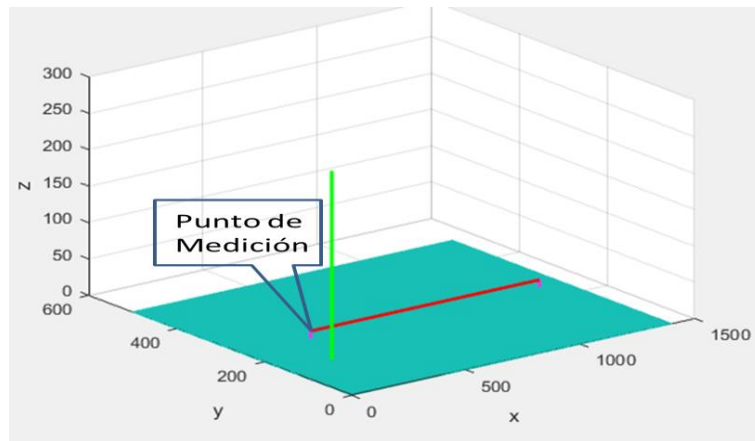
Figura 5. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 1.



**Geometría 2.** Se construye por medio de la importación de datos de un terreno real, para este proyecto no se hizo uso de esta geometría para calcular las tensiones inducidas.

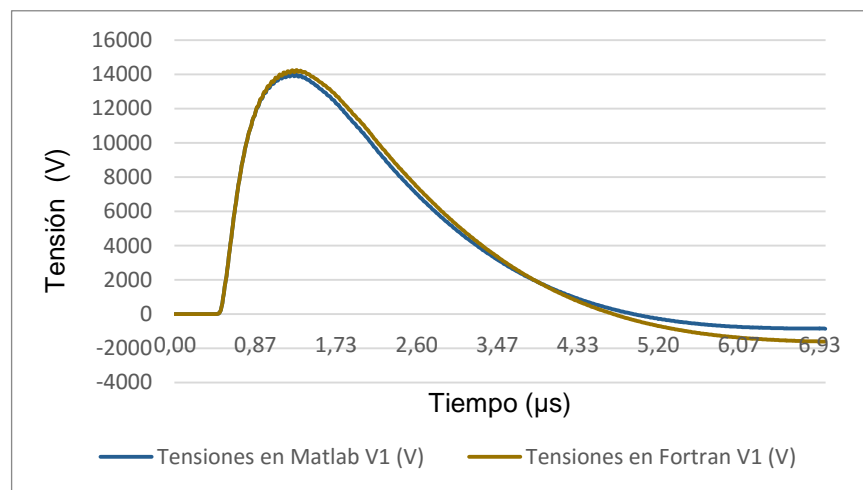
**Geometría 3** Terreno plano utilizado para contrastar los resultados con los otros tipos de terrenos y con otros códigos de proposito similar para terreno plano<sup>57</sup>.

Figura 6. Geometría de análisis 3.



En la figura 7 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 3.

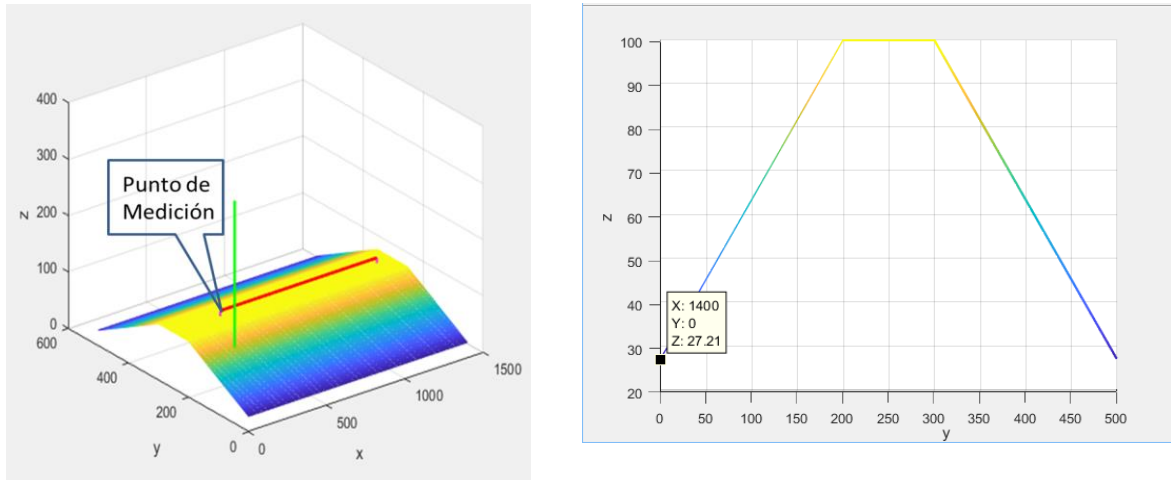
Figura 7. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 3.



**Geometría 4.** Esta figura de modela una formación montañosa continua. Con pendiente de 0.5 que corresponde a un ángulo de inclinación de 45°.

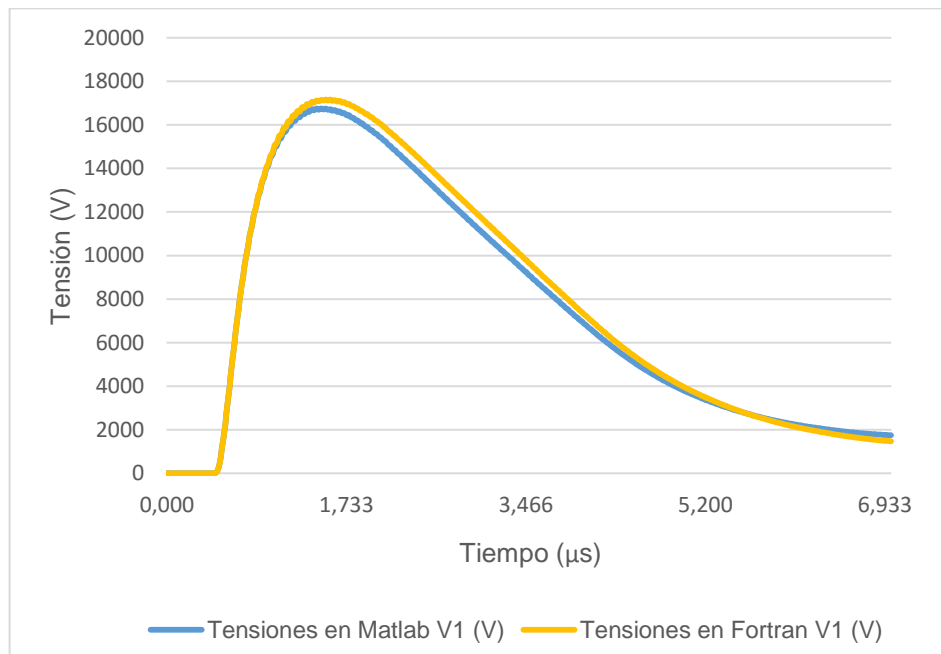
<sup>57</sup> L. Code, «Free version,» [En línea]. Available: <http://www.liov.ing.unibo.it/>.

Figura 8. Geometría de análisis 4.



En la figura 9 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 4.

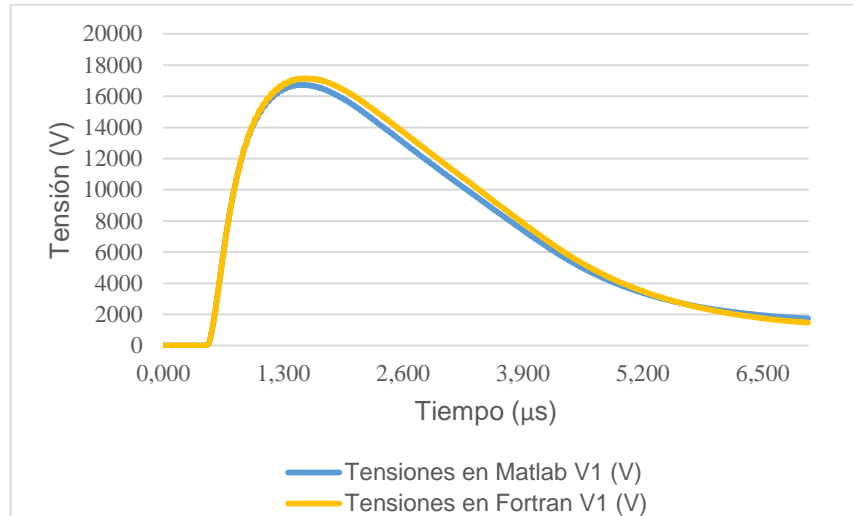
Figura 9. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 4.



**Geometría 5.** Esta geometría es muy similar a la de la figura, sin embargo, debe notarse que la pendiente del plano que modela las laderas del cañón es menor,  $10^\circ$ .

En la figura 10 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 5.

Figura 10. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 5.

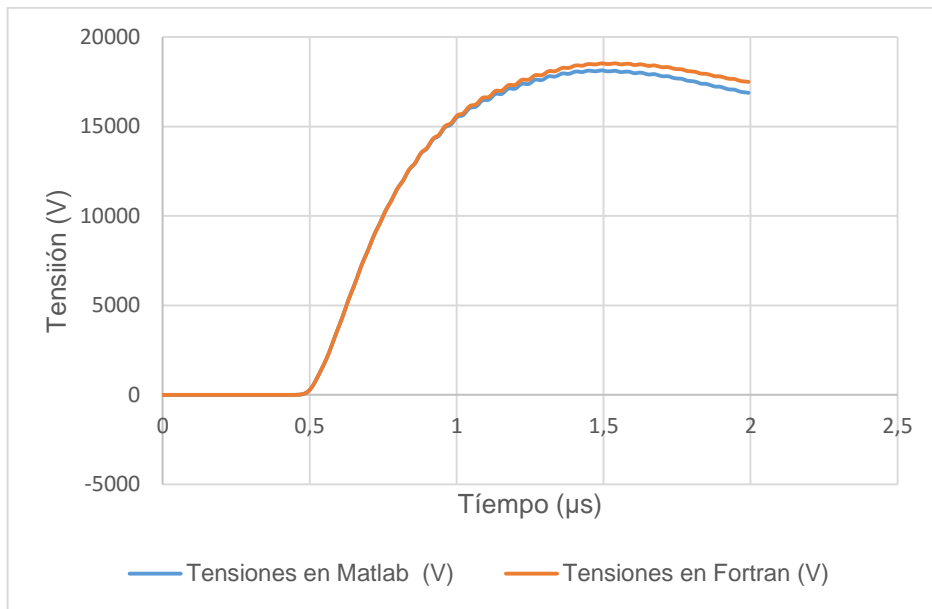


**Geometría 6.** Esta geometría es muy similar a la de la figura, sin embargo la pendiente del plano que modela las laderas del cañón es mayor.

En la figura 11 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 6.

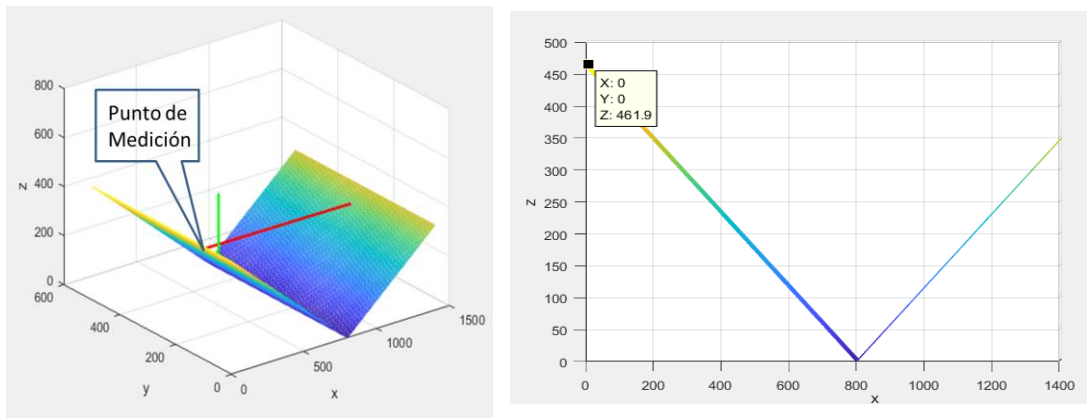
En para cada modelo de terreno se evidenció que los valores obtenidos por Matlab fueron menores (3% en los puntos de interés, tensión pico) que los calculados con el algoritmo traducido a Fortran, sin embargo, la forma de onda de la tensión en la línea de distribución es la misma en la obtenida con Matlab por lo que se considera que el código es adecuado para el cálculo de tensiones inducidas por corrientes de rayos.

Figura 11. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 6.



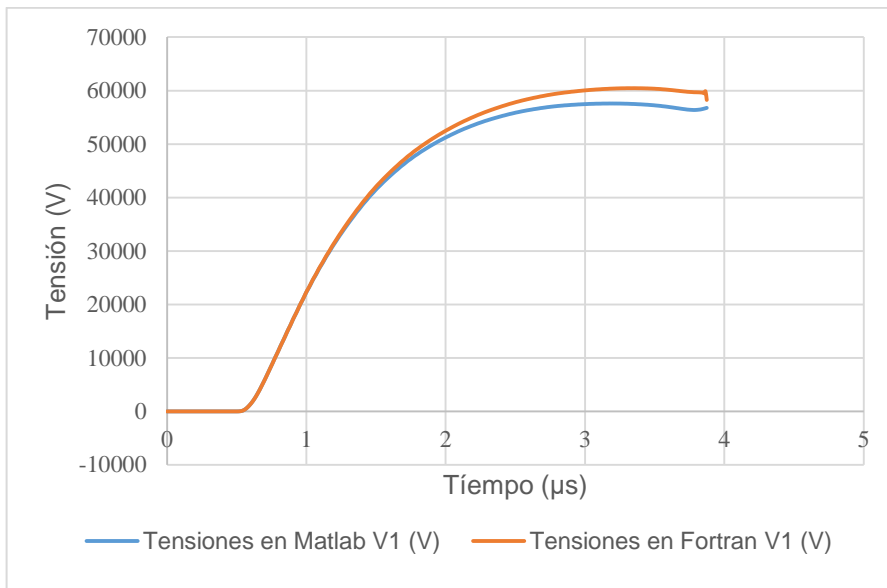
**Geometría 7.** La geometría 7 modela dos inmensas laderas que forman un valle tipo cañón con un ángulo de inclinación de  $30^\circ$  respecto al eje x.

Figura 12. Geometría de análisis 7.



En la figura 13 se muestra el valor de las tensiones inducidas para MATLAB y FORTRAN para la geometría 7.

Figura 13. Tensiones Matlab VS Tensiones Fortran en la geometría 7.



#### 4. DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE LOS IMPACTOS INDIRECTOS EN ZONAS DE MONTAÑA

Dado que el STD IEEE1410-2010 no contempla el estudio de los parámetros del rayo con la topografía que se presenta en las zonas de montaña, se desea construir un modelo de densidad de probabilidad de ocurrencia del rayo en función de la altitud, teniendo en cuenta que para la construcción de este modelo se replanteará la forma de determinar el sitio de ocurrencia descrito por dicho estándar. Este proceso se dificulta debido a la variabilidad de los parámetros que describen el terreno, sin embargo, cuantificar los parámetros de incidencia de los rayos en relación con la altitud permitirá entender el fenómeno del rayo y su relación con las zonas montañosas.

Pese a las dificultades que lleva la construcción de un modelo aceptable que indique los sitios de ocurrencia de las descargas atmosféricas en un terreno llano, se han logrado avances que relacionan los puntos de descarga con los objetos en tierra usando enfoque fractal, también otros estudios abordan este problema desde la caracterización basada en entropía<sup>58,59</sup>. La estimación de los sitios de ocurrencia de rayos es importante porque permite tomar medidas de precaución en los diseños de sistemas de transmisión y distribución de gran envergadura. Sin embargo, para la investigación y elaboración de modelos que pronostiquen los sitios de ocurrencia de los rayos se hace uso de los sistemas de detección de rayos, en Colombia, la red LINET (*Lightning Detection Network*) es el sistema utilizado con este objetivo. El sistema usa sensores (detector de tormentas clase II (EN 50536-1:2011)) ubicados en distintas zonas con topografías variables, trabajan basados en medidas de las

---

<sup>58</sup>

<sup>59</sup>

radiaciones VLF (Very low Frequency), LF (Low frequency) utilizando el método TOA (Time Of Arrival)<sup>60, 61</sup>.

#### **4.1 DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTO PARA HALLAR DDT Y PROBABILIDAD DE LAS DESCARGAS A TIERRA EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.**

Con los datos proporcionados por la red LINET, se desea construir un modelo el cual permita estimar la densidad de descargas a tierra en función de la altitud en un área determinada con los siguientes criterios de selección:

1. Zonas en las cuales se incluya relieve montañoso y amplios intervalos de altitud.
2. Segregando en la medida de lo posible regiones de alta incidencia de rayos, como el Magdalena Medio y el Catatumbo<sup>62</sup>.

Los datos contienen la información de localización del impacto (latitud y longitud), el momento del evento (fecha y hora) y la corriente del impacto. Se cuenta con la información de 3 años (2014, 2015 y 2016), y con la delimitación geográfica de los datos mostrada en la figura, y por las coordenadas dadas en la tabla 4.

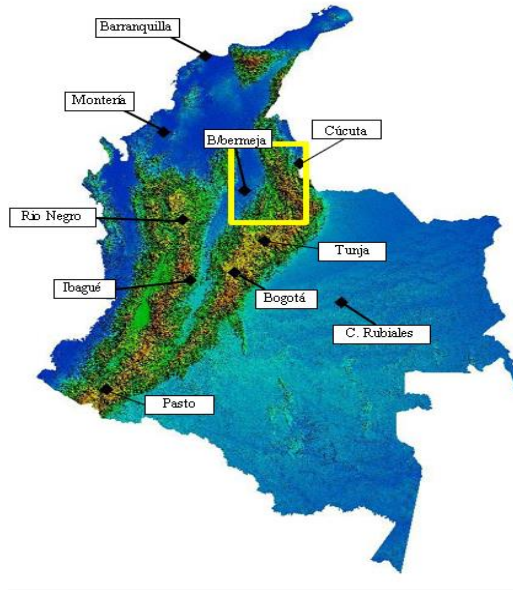
---

<sup>60</sup> Opcit. S. D. Jiménez Rodríguez

<sup>61</sup> D. Aranguren, J. López, J. Inampué, H. Torres y H. D. Betz, «Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography,» de International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, 2014.

<sup>62</sup> H. Torres, El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Bogotá: UNIBIBLOS, 2002.

Figura 14. Localización geográfica las antenas de campo magnético de la red LINET. El rectángulo muestra el área con los datos disponible para el análisis.



Adaptado de D. Aranguren, J. López, J. Inampué, H. Torres y H. D. Betz,

Tabla 4. Coordenadas límites de los datos aportados por la red LINET.

Límite	Latitud	Longitud
Superior derecho.	8.6229	-72.3945
Inferior derecho.	5.4755	-72.3954
Superior izquierdo.	8.6228	-74.6543
Inferior izquierdo.	5.4739	-74.6536

Los datos proporcionados por la red LINET cubren la totalidad del departamento de Santander y parte de los departamentos vecinos, dicha región tiene una longitud de 1200 km y una superficie de 130000km<sup>2</sup> y está compuesta por la cordillera oriental. Hacia las partes bajas está atravesada por cuencas hidrográficas como el río Magdalena, se encuentran valles estrechos y profundos que son la transición de la cordillera a la llanura. Debido a esta diversidad de relieves se pueden encontrar una amplia variedad de pisos térmicos como el cálido, templado, frío, el páramo y de temperaturas que varían desde los 30 °C hasta los 3 °C. Su geografía y tipos de relieve permiten un amplio rango de altitudes, que van desde los 250 msnm hasta los 5000 msnm. Por estas condiciones atmosféricas y topográficas se hace ideal

para la investigación del rayo y su relación con la altura. Sin embargo, por la gran cantidad de datos proporcionados es inviable tomar todos los eventos para analizarlos, y por esta razón, se seleccionan zonas más pequeñas en relación con la zona que cubre la totalidad de los datos proporcionados.

Para la construcción del modelo matemático de la DDT y de la densidad de probabilidad en función de la altura se realizó el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar de zonas para análisis de acuerdo con los criterios mencionados.
2. Obtener la DDT en cada 1 km<sup>2</sup> de las zonas escogidas.
3. Encontrar la altura promedio de cada área de 1 km<sup>2</sup> de las zonas escogidas.
4. Realizar los análisis necesarios: Relacionar cada km<sup>2</sup> con el número de ocurrencia de rayo y agruparlos de acuerdo con su altitud, calcular el promedio de la DDT en intervalos de 100 m y tabular *DDT vs Altitud*.
5. Mediante el análisis de regresión, hallar una ecuación que modele los datos tabulados de la DDT y verificar el modelo mediante coeficientes de correlación.
6. Ajustar la ecuación de la DDT hallada en el paso anterior a diferentes zonas.
7. Normalizar<sup>63</sup> los datos de la tabla encontrada en el paso 4 en relación con el máximo número de eventos para hallar la curva de densidad de probabilidad en función de la altitud.
8. Hallar la curva de probabilidad acumulada en función de la altitud.
9. Ajustar los datos a una distribución de probabilidad conocida.

#### **4.2 SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.**

Para el análisis se buscan áreas con diferentes rangos de altitud y relieves. Teniendo en cuenta la realización de los análisis se tomaron 2 zonas con los criterios de selección mencionados con la finalidad de realizar una comparación de

---

<sup>63</sup> Entiéndase aquí como ajustar los índices de la densidad de descargas a tierra a un a escala porcentual.

los resultados obtenidos. Estas zonas son de 1000 km<sup>2</sup> y 1300 km<sup>2</sup> aproximadamente, las cuales se encuentran diferentes niveles de altitud de manera continua. Al escoger estas zonas de estudio la cantidad de datos a analizar es elevada y debido al gran tamaño de las zonas se obtienen mayores rangos de altitud y disminución de la desviación estándar de los análisis<sup>64</sup>. Siguiendo los criterios y ajustes mencionados anteriormente, se seleccionaron las zonas de estudio mostradas en la figura 15, y sus coordenadas se dan en la tabla 5.

Figura 15. Ubicación geográfica de las zonas de estudio.

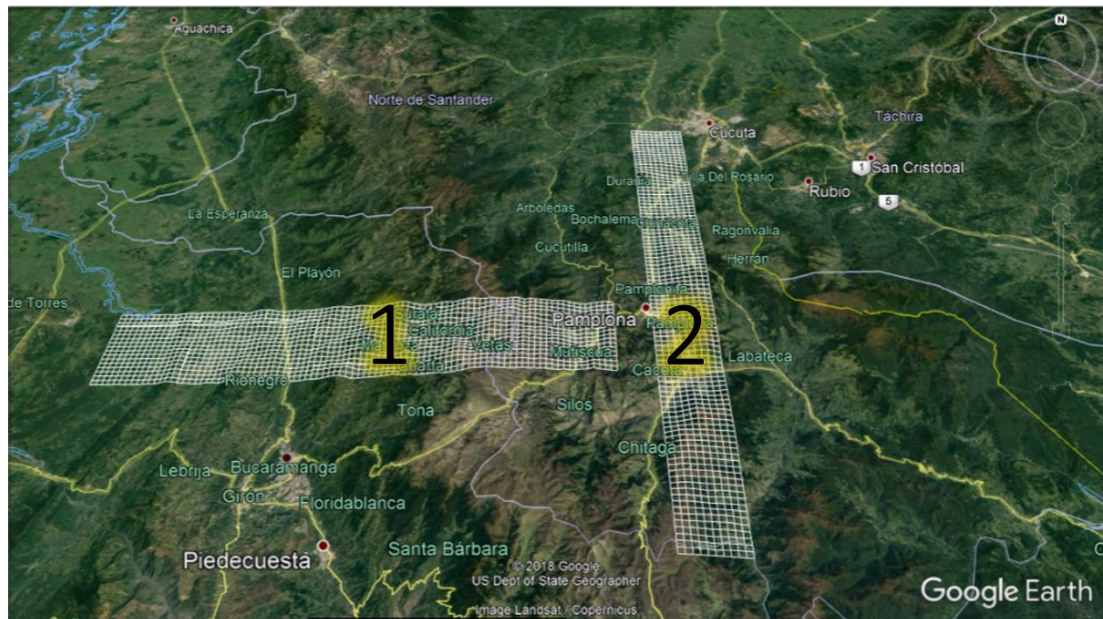


Tabla 5. Coordenadas de las zonas de estudio.

Zona de Estudio	Limite	Altitud	Longitud
1	Superior derecho	7.40128	-72.70339
1	Inferior derecho	7.25826	-72.70339
1	Superior izquierdo	7.40128	-73.42643
1	Inferior izquierdo	7.25826	-73.42643
2	Superior derecho	7.87920	-72.55194
2	Inferior derecho	6.97920	-72.55194
2	Superior izquierdo	7.87920	-72.64194
2	Inferior izquierdo	6.97920	-72.64194

<sup>64</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

**Zona de estudio 1.** Es una zona de tamaño aproximado de 1300 km<sup>2</sup> la cual comprende un rango de alturas de 100 a 4100 msnm, se encuentra entre los departamentos de Santander y Norte de Santander, su relieve está compuesto por una llanura que se encuentra cerca del municipio de sabana de torres y con una zona montañosa que se encuentra cerca del municipio de Pamplona Norte de Santander, esta área tiene una altura promedio de 1796 msnm.

**Zona de estudio 2.** Zona de tamaño aproximado de 1000 km<sup>2</sup>, comprende un rango de alturas que van desde los 200 hasta los 3600 msnm, se encuentra ubicada en el departamento de Norte de Santander, al igual que la zona anterior en su relieve se encuentran llanuras y zonas de montaña. Se encuentra ubicada cerca de la ciudad de Cúcuta, esta área tiene una altura promedio de 2056 msnm.

#### **4.3 PROCEDIMIENTO PARA HALLAR LA CANTIDAD DE DESCARGAS OCURRIDAS EN CADA ÁREA**

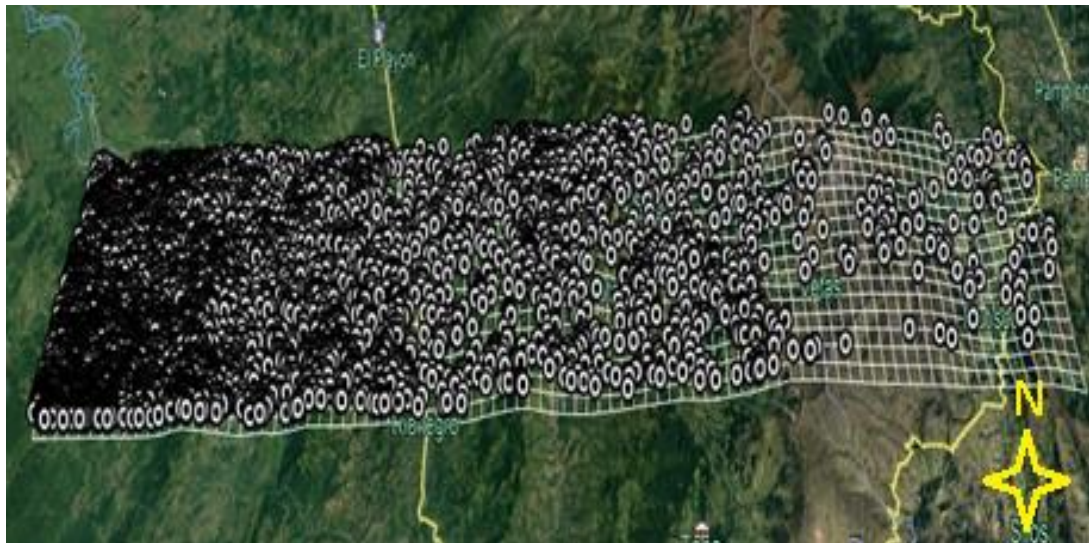
Se desea encontrar la cantidad de rayos que se presentan en cada área de 1 km<sup>2</sup> durante un año en las zonas analizadas. Para ello se realiza un conteo de los datos para cada área, mediante el uso del software QGIS que es un sistema de información geográfico de código abierto; funciona en la mayoría de las plataformas Unix, Windows y OS X. Esta herramienta proporciona una alta gama de funciones básicas donde se puede visualizar, gestionar, editar, y analizar datos espaciales. A continuación, se describe el procedimiento para el conteo de la cantidad de descargas a tierra.

**Generación de la cuadrícula.** Para contar las ocurrencias de rayo registradas, se crea una malla vectorial cuadriculada la cual abarque la totalidad de la zona a analizar. La cuadrícula está conformada por cuadrados de dimensiones de 1 km<sup>2</sup>. Fue creada a con las herramientas del software QGIS. Se crearon dos mallas, una

para cada zona analizada. En este caso para la zona 1 se creó una malla vectorial en la cual se encuentran un total de 1530 cuadrados, y la zona 2 se encuentran un total de 1000.

**Carga de los eventos.** Se importan desde un archivo de texto la información de la localización (latitud y longitud) de cada uno de los eventos de descargas atmosféricas ocurridas desde el año 2014 hasta el 2016 al programa QGIS.

Figura 16. Malla generada con la totalidad de los datos de la zona de estudio 1.



**Selección de los eventos.** Al tener cargada la información de la localización de los impactos de los rayos de cada año, y mediante la utilización de la malla vectorial se seleccionan la cantidad de eventos que cubre cada zona escogida y que serán sujeto de análisis. Se debe tener en cuenta que la cantidad de eventos varía respecto a cada año de estudio.

**Cantidades de eventos que se presentan en un 1 km<sup>2</sup>.** Con las herramientas estadísticas de QGIS se procede al realizar el conteo de los eventos que se encuentran en cada cuadrado de la malla. Este proceso se realiza para cada uno

de los tres años, tomando como referencia el primer cuadrado que se encuentra en la parte superior izquierda y continuando de izquierda a derecha.

Tabla 6. Total de los eventos en las zonas de estudio.

Eventos/año.	2014	2015	2016	Total de los eventos.
Zona de estudio 1	5198	7349	11014	23561
Zona de estudio 2	786	721	3208	4715
Total	5984	8070	14222	28276

#### 4.4 ALTURA PROMEDIO DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.

Para conocer la altura promedio de cada uno de los cuadrados de un 1 km<sup>2</sup> se crea una matriz de puntos de separación que de aproximadamente 100 metros para obtener valor acertado de la altura promedio entre cada punto hasta completar la totalidad del área de estudio, cada punto de esta malla contiene información de latitud y longitud.

La matriz de puntos se exporta en un archivo georreferenciado con la información de altitud. Esto es posible gracias al uso de la página de internet *gpsvisualizer.com*, La página ofrece lectura de datos en numerosos formatos usados por sistemas GPS y software de georreferenciación. Proporciona un nuevo archivo con la información de altitud, la cual puede ser procesada con el módulo estadístico de QGIS, hallando así la altura promedio de cada elemento de la cuadrícula.

#### 4.5 CÁLCULO DEL PROMEDIO DE LA DDT

En este punto del proceso cada cuadrado de 1 km<sup>2</sup> tiene un valor promedio de altura sobre el nivel del mar y una cantidad de rayos a tierra para cada año. Se procede a exportar los datos de DDT y altitud de QGIS al software Microsoft Excel para el análisis y realización de gráficas<sup>65</sup>.

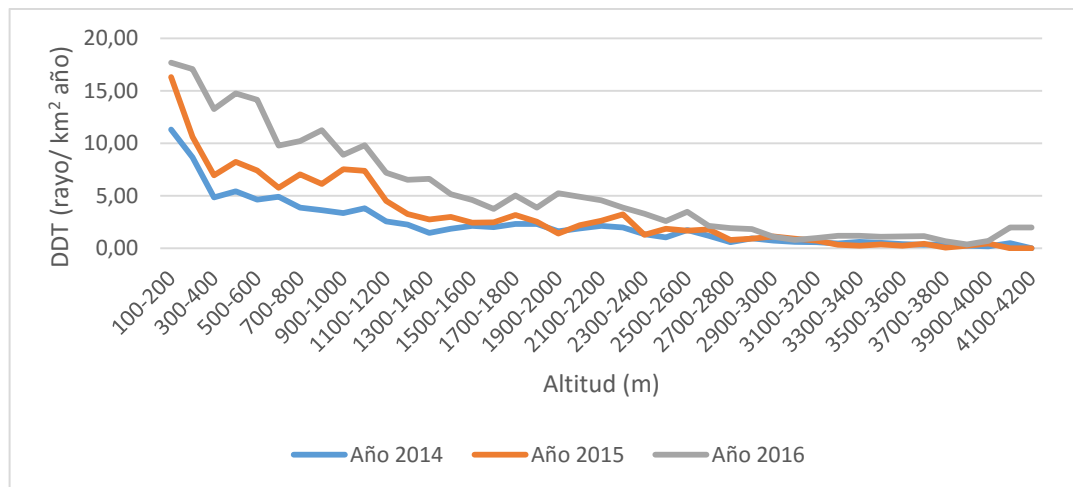
---

<sup>65</sup> Adviértase que QGIS tiene modulo matemático y estadístico, pero se escogió MS Excel por su facilidad de uso.

Para cada zona se procede a realizar gráficas de la densidad de descargas a tierra para cada año, las cuales se construyeron agrupando los datos en intervalos de 100 m con el objetivo de obtener una mejor apreciación del promedio de las descargas atmosféricas figura 17 y anexo A.1.

Se realiza un análisis de los eventos que se encuentran en los rangos de altura de cada zona de estudio. Para la zona de estudio 1, se da inicio en el intervalo de 100-200 msnm y se finaliza en el intervalo de 4100-4200 m, y para la zona de estudio 2, el rango de inicio fue de 200-300 msnm y se finaliza en el rango de 3600-3700 m.

Figura 17. Promedio de las descargas atmosféricas para la zona de estudio 1.



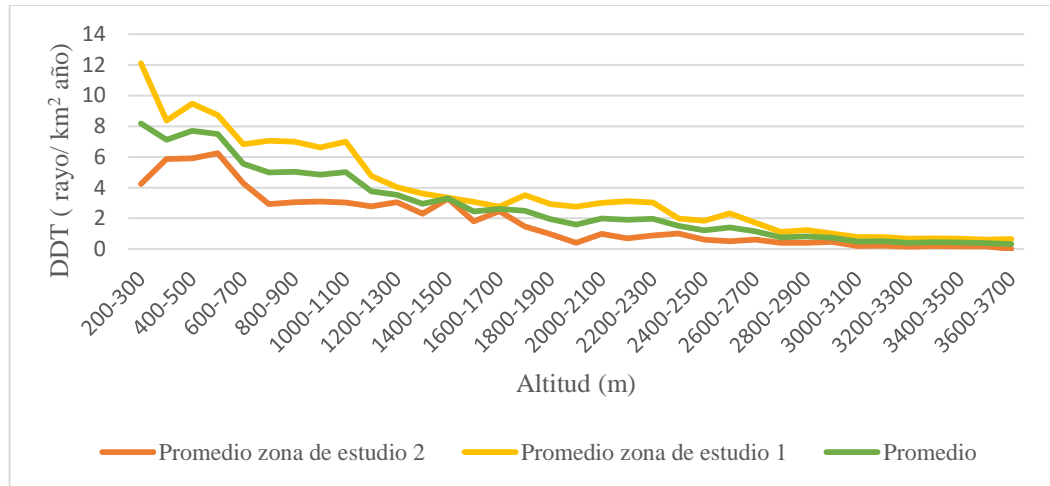
La figura 17 muestra los valores promedio de las descargas atmosféricas de la zona 1 para cada uno de los años de estudio (2014, 2015, 2016), en general la densidad de descargas a tierra disminuye respecto a la altitud. Para ver la gráfica del promedio de las descargas atmosféricas de la zona 2 ver el anexo A.1.

#### 4.6 OBTENCIÓN DEL MODELO DE LA DDT EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.

Después de contar con los análisis realizados se procede a encontrar el valor promedio en los tres años de los eventos ocurridos en cada zona de estudio por

separado, de esta forma, se permite visualizar las diferencias de la de la DDT en las zonas. En la figura 18 se puede visualizar que para la zona de estudio ubicada en el costado occidental de la cordillera la densidad de descargas a tierra es mayor que en el sector oriental.

Figura 18. Contraste de la DDT en las zonas analizadas



**4.6.1 Modelos matemáticos.** Los modelos matemáticos que se construyen mediante el uso de la regresión exponencial y logarítmica con base en el promedio de los datos de las dos zonas. Las curvas obtenidas mediante las regresiones se muestran en la figura junto con el promedio de los datos de ambas zonas.

La ecuación resultante de la regresión exponencial es:

$$DDT(z) = 10.221 * e^{-0.00095*z} + \epsilon_{rr} \quad (0.17)$$

$$R^2 = 0.9479$$

La ecuación resultante del modelo logarítmico es:

$$DDT(z) = -2.652 \ln\left(\frac{z}{100}\right) + 9.754 + \epsilon_{rr} \quad (0.18)$$

$$R^2 = 0.9467$$

Donde:

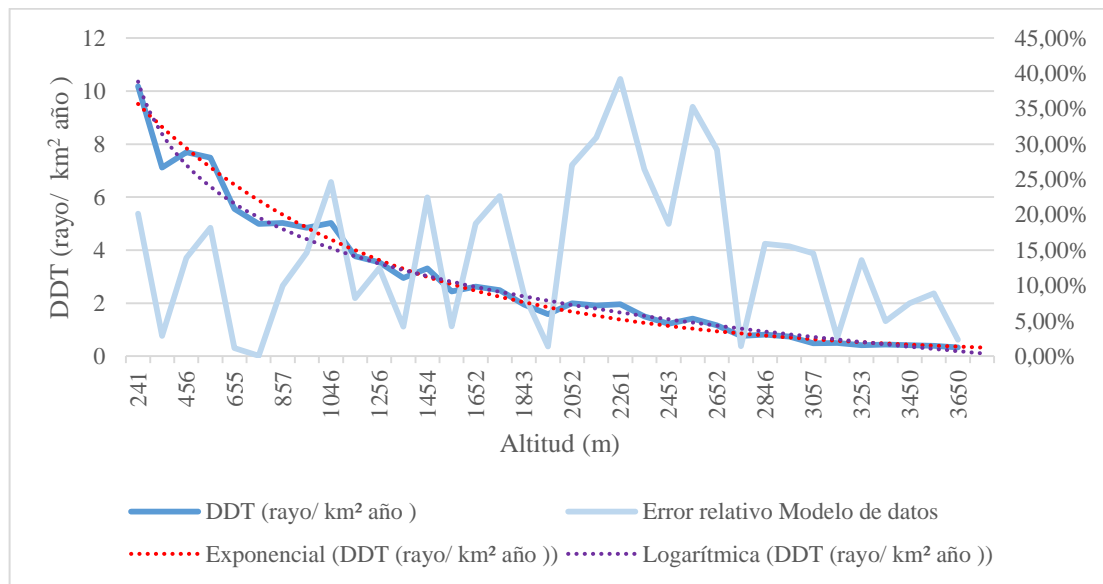
**DDT (z):** Densidad de descargas a tierra en función de la altitud.

**z:** Altitud en metros sobre el nivel del mar.

$\epsilon_{rr}$  : Error

**R:** Coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 19. Valor promedio de los eventos en las dos zonas, superpuestos los modelos analíticos hallados



Teniendo en cuenta los dos modelos encontrados, se escoge el modelo exponencial para modelar la DDT debido a que presenta un mayor valor del coeficiente de correlación ( $R^2$ ). En la figura 16 se muestra el error relativo del modelo respecto a la media e los datos en cada intervalo.

#### 4.7 AJUSTE DE DENSIDAD DESCARGAS A TIERRA DDT (Z) PARA OTRAS ZONAS

Debido a la diversidad de las condiciones geográficas, atmosféricas y climatológicas que se encuentran en el país, es imposible crear un único modelo que calcule el valor de la DDT en cualquier zona, para ello es necesario realizar modificaciones al modelo base seleccionado con las que se pueda obtener un valor de DDT.

En caso que en una región se tenga un valor de referencia **DDT<sub>ref</sub>** (valor conocido de la DDT de un lugar) y la DDT calculada con la ecuación 4.1 tenga un desviación muy grande en relación con la **DDT<sub>ref</sub>**, se puede seguir el siguiente procedimiento para ajustar el modelo a la región de interés.

1. Revisar que la zona geográfica no esté sometida a altos niveles de incidencia de rayos siguiendo los criterios presentados en la sección 4.2.
2. Conocer el valor de altitud promedio *z<sub>ref</sub>* del sitio asociado a la **DDT<sub>ref</sub>**. Se dan ejemplos en la
3. Tabla que muestra los valores de DDT y altura promedio de diferentes ciudades del país.
4. Calcular el factor de ajuste K. Conociendo el valor de la DDT y teniendo cuenta la relación entre la altitud de referencia del modelo base (**DDT<sub>ref</sub>**) y la altitud promedio (*z<sub>ref</sub>*) del lugar de referencia seleccionado se halla el valor de K despejándolo de la ecuación (0.19). Nótese que el segundo término de la ecuación es un factor de ajuste añadido a la ecuación de que surge de la regresión lineal, con el propósito de compensar el error. El factor consta de una proporción entre la altitud *Z<sub>ref</sub>* y la altitud promedio de toda la zona analizada (1926 msnm).

$$DDT_{ref} = 10.221 * e^{-0.00095 * Z_{ref}} + K * \frac{Z_{ref}}{1925.901} \tag{0.19}$$

$$K = \frac{(DDT_{ref} - 10.221 * e^{-0.00095 * Z_{ref}}) * 1925.901}{Z_{ref}}$$

Dónde:

**DDT<sub>ref</sub>**: Valor de la DDT del lugar al que se desea ajustar el modelo.

**z<sub>ref</sub>**: Altura promedio del lugar al que se desea ajustar el modelo.

5. Conocido el valor de ajuste *K* se procede a hallar el valor de la DDT promedio en las zonas cercanas a la región.

$$DDT(z) = 10.221 * e^{-0.00095*z} + K * \frac{z}{1925.901} \quad (0.20)$$

Donde:

**z**: altura de la zona a la cual se desea conocer el valor de DDT.

**K**: factor de ajuste que se asocia a la zona que se analiza. Varía dependiendo del valor DDT que se tome como referencia.

Tabla 7. Valores de DDT de referencia

Ciudad	z <sub>ref</sub>	DDT <sub>ref</sub>	Validación DDT
Bucaramanga	1000	3	4
Cartagena	2	9	10
Barranquilla	18	9	10
Armenia	1480	4	3
Bogotá	2630	4	1
Cali	1018	10	9
Manizales	2150	5	2
Tunja	2810	1	1

*Nota: La DDT<sub>ref</sub> es adaptada visualmente del mapa de la figura 9 de [34]. Los valores obtenidos en la columna "validación de la DDT" se obtuvieron analíticamente de la ecuación (0.21)*

En caso de no tener un valor de DDT de referencia se puede utilizar la ecuación (0.21) hallada a partir de la ecuación (0.20) y (0.19), ajustando empíricamente la curva a algunos ejemplos de DDT conocidos mostrados en la Tabla 7. Por ejemplo, para alturas 0 a 1000 msnm la ecuación (0.17) se ajusta perfectamente, para alturas 1000 a 2000 msnm se seleccionó la ciudad de Armenia y para alturas mayores a 2000 msnm se seleccionó la ciudad de Tunja, y para las alturas conociendo los valores de la DDT de referencia de estas dos ciudades se procede a hallar el valor de ajuste *K*.

$$DDT(z) = \begin{cases} 10.221e^{-0.00095z}, & 0 < z < 1000 \text{ m} \\ 10.221e^{-0.00095z} + 0.64\left(\frac{z}{1925.901}\right), & 1000 < z < 2000 \text{ m} \\ 10.221e^{-0.00095z} + 0.20\left(\frac{z}{1925.901}\right), & z > 2000 \text{ m} \end{cases} \quad (0.21)$$

Esta ecuación se valida comparando los valores de  $DDT_{ref}$  y los obtenidos analíticamente mediante la ecuación (0.21), la cual se puede utilizar en cualquier zona del país asumiendo que las descargas atmosféricas no estén afectadas por efectos diferentes a la altitud.

#### 4.8 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS DESCARGAS EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD.

Con la información de los impactos de rayos obtenidos de la red LINET en la zona de análisis se realiza una tabulación de datos con la finalidad de establecer una curva de densidad de probabilidad y distribución acumulada que relacione las ocurrencias del rayo con la altitud.

##### Distribución de probabilidad en función de la altitud

Para hallar las funciones de probabilidad se realizan los pasos 7, 8, y 9 presentados en la última parte de la sección 4.1. Se organizan los eventos de las descargas atmosféricas de menor a mayor altitud y se normaliza la DDT siguiendo la ecuación (0.23) para hallar la densidad de probabilidad experimental  $f_{expr}$ , y la probabilidad acumulada  $F_{expr}$ , como se muestra en la Tabla 8.

.  $z_{n+1} > z_n$  Se, organizan de mayor a menor.

$$f_{expr_n} = \sum_{n=0}^N DDT_{expr_n}(z_n) = 121.67 \quad (0.22)$$

$$f_{expr_n} = \frac{DDT_{expr_n}(z_n)}{121.67} \quad (0.23)$$

$$F_{expr_{n+1}} = F_{expr_{n-1}} + f_{expr_n}$$

Donde:

$N$ : número total de intervalos de altitud (para para el presente análisis  $N=41$ ).

$z_n$ : altitud promedio  $z$  de un intervalo  $n$ .

$DDT_{expr_n}$ : es el valor promedio de DDT obtenido de los datos de la red LINET para un intervalo  $n$  de la columna altitud (Rayo/km<sup>2</sup> año).

$f_{expr_n}$ : es la densidad de probabilidad (%) para un intervalo  $n$ .

$F_{expr_n}$ : es la probabilidad acumulada (%) hasta un intervalo  $n$  de altitud.

Tabla 8. Promedio DDT y valores experimentales de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada.

Altitud (m)	Número de intervalo $n$	Altitud promedio (m)	DDT Rayo/km <sup>2</sup> año	Densidad de Probabilidad	Probabilidad Acumulada
100-200	1	167,07	15,09	12,41%	12,41%
200-300	2	244,35	10,71	8,80%	21,20%
300-400	3	348,55	7,62	6,26%	27,47%
400-500	4	455,10	8,84	7,27%	34,74%
500-600	5	541,57	8,20	6,74%	41,47%
600-700	6	655,50	5,84	4,80%	46,27%
700-800	7	757,00	5,78	4,75%	51,02%
800-900	8	855,72	5,51	4,53%	55,56%
900-1000	9	954,66	5,23	4,30%	59,85%
1000-1100	10	1051,23	4,87	4,00%	63,86%
1100-1200	11	1149,53	3,53	2,90%	66,76%
1200-1300	12	1256,21	3,35	2,76%	69,51%
1300-1400	13	1349,40	2,88	2,37%	71,88%
1400-1500	14	1444,73	3,32	2,73%	74,61%
1500-1600	15	1549,69	2,56	2,11%	76,71%
1600-1700	16	1652,73	2,69	2,21%	78,92%
1700-1800	17	1754,67	2,74	2,25%	81,17%
1800-1900	18	1851,05	2,14	1,76%	82,93%
1900-2000	19	1953,25	1,68	1,38%	84,31%
2000-2100	20	2047,28	2,06	1,69%	86,00%
2100-2200	21	2156,14	1,83	1,50%	87,50%
2200-2300	22	2257,76	1,88	1,55%	89,05%
2300-2400	23	2347,29	1,45	1,19%	90,25%

<b>2400-2500</b>	24	2452,44	1,26	1,03%	91,28%
<b>2500-2600</b>	25	2545,78	1,32	1,09%	92,37%
<b>2600-2700</b>	26	2650,83	1,16	0,96%	93,32%
<b>2700-2800</b>	27	2752,08	0,68	0,56%	93,88%
<b>2800-2900</b>	28	2845,91	0,76	0,62%	94,50%
<b>2900-3000</b>	29	2948,23	0,71	0,58%	95,09%
<b>3000-3100</b>	30	3056,79	0,47	0,38%	95,47%
<b>3100-3200</b>	31	3153,99	0,49	0,40%	95,87%
<b>3200-3300</b>	32	3248,27	0,37	0,31%	96,18%
<b>3300-3400</b>	33	3360,69	0,51	0,42%	96,60%
<b>3400-3500</b>	34	3449,10	0,41	0,34%	96,94%
<b>3500-3600</b>	35	3545,16	0,45	0,37%	97,31%
<b>3600-3700</b>	36	3649,80	0,64	0,53%	97,84%
<b>3700-3800</b>	37	3753,69	0,39	0,32%	98,16%
<b>3800-3900</b>	38	3851,26	0,28	0,23%	98,39%
<b>3900-4000</b>	39	3951,40	0,45	0,37%	98,77%
<b>4000-4100</b>	40	4013,29	0,83	0,68%	99,45%
<b>4100-4200</b>	<b>41</b>	4115,77	0,67	0,55%	<b>100,00%</b>
<b>Total, general</b>	--	---	<b>121,67</b>	<b>1</b>	---

Finalmente con los datos obtenidos para la columna de densidad de probabilidad acumulada se procede a hacer una regresión exponencial usando la función *fitnlm* de Matlab (ver código usado en anexo), obteniéndose la ecuación (0.24) que representa la probabilidad acumulada de una ocurrencia  $X$  menor a una altitud determinada.

$$F(z) = P(X < z) = \begin{cases} 1.0162 - 1.094e^{-915.89 \cdot 10^{-6} \cdot z}, & z_{\min} < z < z_{\max} \\ 0, & z \geq z_{\max} \\ 0, & z < z_{\min} \end{cases} \quad (0.24)$$

$$R=0.994$$

Dónde:

$F$ : Distribución de probabilidad en función de  $z$ .

$P(X < z)$ : Probabilidad acumulada de ocurrencia de rayo hasta una altura  $X$ .

$z$ : Parámetro de altitud (msnm).

$z_{\max}$ : Máxima altitud registrada de ocurrencia de rayo en las zonas analizadas, 4200 m.

$z_{\min}$ : Mínima altitud de ajuste<sup>66</sup> para el modelo de datos.

La ecuación 4.6 se grafica

### Densidad de probabilidad en función de la altitud.

Dado que el coeficiente de correlación de la función distribución de probabilidad que se encontró es cercano a la unidad, se podría evidenciar que se ajusta a la curva de distribución de probabilidad acumulada de los impactos por descargas atmosféricas. Partiendo de la ecuación analítica de probabilidad acumulada se procede a calcular la función densidad de probabilidad usando del segundo teorema fundamental del cálculo ecuación (0.25). Ambas curvas se muestran en la ecuación

$$\frac{d}{dz} \left[ \int_{q(z)}^{p(z)} f(x) dx \right] = f(p(z)) * \frac{d}{dz} [p(z)] - f(q(z)) * \frac{d}{dz} [q(z)] \quad (0.25)$$

De acuerdo con la ecuación 2.3, 2.4 y 4.7 se pueden escribir la ecuación (0.25) de la siguiente forma [17]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left[ \int_{z_{\min}}^z f(x) dx \right] &= \frac{d}{dz} [1.0162 - 1.094e^{-915.89*10^{-6}*z}] \\ \frac{d}{dz} \left[ \int_{z_{\min}}^z f(x) dx \right] &= f(p(z)) * p'(z) - f(z_{\min}) * q'(z) \end{aligned} \quad (0.26)$$

Dando solución a la derivada y teniendo en cuenta que  $p(z)=z$  y  $q(z)=z_{\min}$ , se encuentra que la función densidad de probabilidad  $f(z)$  es:

$$f(z) = 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89*10^{-6}*z} \quad (0.27)$$

De acuerdo con las propiedades de la función densidad de probabilidad en la ecuación (0.6), y teniendo en cuenta el máximo valor de altitud donde se ha

---

<sup>66</sup>Téngase en cuenta que el valor de esta altitud no se está forzando a coincidir con la altitud mínima de registrada en la ocurrencia de rayo, este valor es hallado analíticamente de la ecuación (0.28).

registrado una ocurrencia de rayo en la zona de estudio, se plantea la ecuación (0.26) para hallar la altitud mínima. Esta función se ajusta de manera aceptable a la densidad de probabilidad de descargas a tierra.

$$\int_{-\infty}^{\infty} 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * z} dz$$

$$= \int_{z_{\min}}^{4200} 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * z} dz = 1 \quad (0.28)$$

A partir de la integración de la ecuación 4.10 se obtiene:

$$1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * 4200} - 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * z_{\min}}$$

$$= 1 \quad (0.29)$$

$$\therefore z_{\min} \approx 73$$

Donde:

$z_{\min}$ : es la altitud mínima (msnm) a partir de la cual la ecuación formulada cumple con los criterios estadísticos de la (0.5).

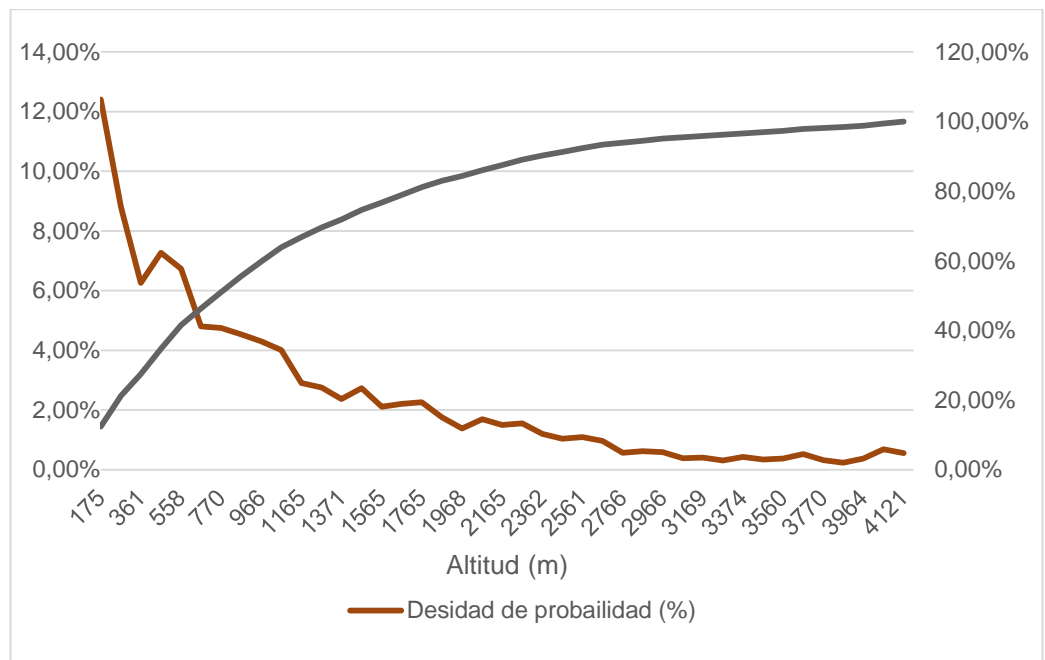
Se puede deducir que al considerarse una superficie de relieve tridimensional, irregular (montañoso), mayor a 500 km<sup>2</sup>; en consonancia con<sup>67</sup>, la distribución de probabilidad de impacto de rayo sobre la superficie puede escribirse como se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Probabilidad de impacto de rayos a tierra en relación con la altitud.

Nombre Función	Ecuación en función de altitud, z. (m)
Densidad de probabilidad (%)	$f(z) = \begin{cases} 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * z}, & 73 < z < 4200 \\ 0, & z \geq 4200 \\ 0, & z < 73 \end{cases}$
Distribución de probabilidad acumulada (%)	$F(z) = P(X < z)$ $= \begin{cases} 1.0162 - 1.094 e^{-915.89 * 10^{-6} * h}, & 73 < z < 4200 \\ 0, & z \geq 4200 \\ 0, & z < 73 \end{cases}$

<sup>67</sup> A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone, «An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 22, nº 1, pp. 684-692, 2007.

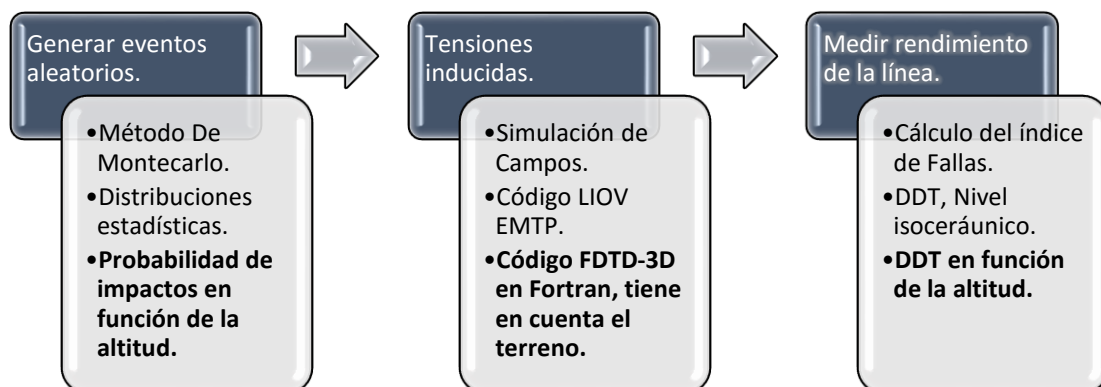
Figura 20. Densidad de probabilidad, Distribución de probabilidad acumulada.



## 5. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN EN SISTEMA MONTAÑOSO

Actualmente el estándar IEEE 1410 contiene la metodología utilizada para obtener el índice de fallas en las líneas de distribución ante impactos indirectos. Esta guía se enfoca en terrenos planos. Debido a las condiciones geográficas y topográficas de Colombia, la interpretación y resultados obtenidos con dicho estándar pueden ser alejadas de la realidad. Por ello se hace necesario realizar un complemento en el que incluya el efecto de la altitud, se estudie el efecto que puede ocasionar en estas zonas montañosas los impactos indirectos a los sistemas eléctricos, y en el que se evidencie las diferencias de la tasa de fallas para terrenos planos y no planos. El desarrollo de este capítulo consiste en presentar un complemento a la metodología del estándar IEEE 1410 para considerar los terrenos no planos y su relación al fenómeno del rayo mediante el uso de las funciones de probabilidad y el modelo de la DDT, obtenidos en el capítulo anterior (sección 4.7 y 4.8). En la figura 21 se muestra un esquema de la metodología del STD IEEE 1410-2010 resaltándose en **negrita** resaltan los puntos propuestos en esta tesis.

Figura 21. Esquema de la metodología propuesta.



## 5.1 AJUSTE PROPUESTO AL PROCEDIMIENTO DEL SDT IEEE 1410-2010 PARA HALLAR ÍNDICE DE FALLAS POR IMPACTOS INDIRECTOS DE RAYOS<sup>68</sup>

El procedimiento descrito en el anexo B2.2 del estándar IEEE 1410-2010 estima la tasa de fallas las tensiones inducidas por rayos de las líneas eléctricas. Esta técnica incluye el método de Montecarlo que permite una inserción de las funciones de probabilidad de las variables involucradas (corriente pico  $I_p$ , tiempo de frente  $t_f$ , y la distancia a la línea.), junto con sus coeficientes de correlación. El proceso que se propone para la obtención del índice de fallas en líneas de distribución por impactos indirectos se describe a continuación:

**Paso 1.** Generación de una gran cantidad de eventos que sigan las distribuciones de probabilidad asignadas a cada parámetro del rayo (corriente pico, tiempo de frente, distancia de la línea, altitud del terreno sobre el que esta la línea de distribución) se generan aleatoriamente las variables involucradas en el método:

1. La distribución log-normal de la Corriente pico  $I_p$  está representada en la ecuación (0.30). Tomada de<sup>69, 70</sup>

$$f_1(I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times I_p \times \sigma_{\ln I_p}} \times \exp\left[-\frac{(\ln I_p - \mu_{\ln I_p})^2}{2\sigma_{\ln I_p}^2}\right] \quad (0.30)$$

2. La distribución log-normal del tiempo de frente de onda  $t_f$  está representada en la ecuación (0.31). Tomada de<sup>71</sup>.

---

<sup>68</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>69</sup> Ibid

<sup>70</sup> Opcit A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone,

<sup>71</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

El valor del tiempo de frente  $t_f$  se calcula mediante el uso el factor de correlación de 0.47 en la corriente  $I_p$ .

$$f_2(t_f|I_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times t_f \times \sigma_{\ln t_f}^*} \times \exp\left[-\frac{(\ln t_f - \mu_{\ln t_f}^*)^2}{2\sigma_{\ln t_f}^{*2}}\right] \quad (0.31)$$

$$\mu_{\ln t_f}^* = \mu_{\ln t_f} + \rho \frac{\sigma_{\ln t_f}}{\sigma_{\ln I_p}} (\ln I_p - \mu_{\ln I_p}) \quad (0.32)$$

$$\sigma_{\ln t_f}^* = \sigma_{\ln t_f} \sqrt{1 - \rho^2} \quad (0.33)$$

Donde:

$\mu_{\ln I_p}$ : es el promedio de  $\ln(I_p)$ .

$\sigma_{\ln I_p}$ : Desviación estándar de  $\ln(I_p)$ .

$\mu_{\ln t_f}$ : es el promedio de  $\ln(t_f)$ .

$\sigma_{\ln t_f}$ : Desviación estándar de  $\ln(t_f)$ .

$\rho$ : Coeficiente de correlación.

Siendo estos parámetros caracterizados por una distribución log-normal adaptada del CIGRE como se indica en<sup>72</sup>.

3. Distancia a la línea. Se determina la localización del impacto del rayo en la superficie de análisis que está dada por las coordenadas  $X_0$  y  $Y_0$  de impacto, que surgen aleatoriamente siguiendo una densidad de probabilidad uniforme para una superficie plana<sup>73</sup> y que deben estar ubicados en zona de los impactos indirectos.

<sup>72</sup> Opcit A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone

<sup>73</sup> Ibid.

La distribución de probabilidad uniforme para la distancia a la línea está dada por la ecuación (0.34). Adaptada de<sup>74</sup>.

$$f_3(y) = \begin{cases} \frac{1}{y_{max} - y_{min}}, & y_{min} < y < y_{max} \\ 0 & \text{cualquier otro} \end{cases} \quad (0.34)$$

Adoptando el modelo de incidencia propuesto en el Std. IEEE-1410 2010<sup>75</sup>, se seleccionan los eventos relevantes tal que la distancia de los impactos esté entre “ $x_{min}$ ” y “ $x_{máx}$ ”, “ $y_{min}$ ” y “ $y_{máx}$ ”, como se muestra en la ecuación que se describe mediante la ecuación (0.35), para hallar el área del dominio computacional donde se generan las simulaciones.

$$d_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (0.35)$$

$$r_s = 10I_0^{0.65} \quad (0.36)$$

$$r_g = 0.9r_s \quad (0.37)$$

$$A = ((y_{máx} - y_{mín}) - 2 d_{mín}) * (x_{máx} - x_{mín}) \quad (0.38)$$

Donde:

$d_{min}$ : es la distancia mínima desde la línea en la cual los impactos se consideran directos en (m)

$r_s$ : distancia crítica de la descarga al conductor (m).

$r_g$ : distancia del impacto a tierra (m).

$h$ : altura promedio del conductor respecto al suelo (m).

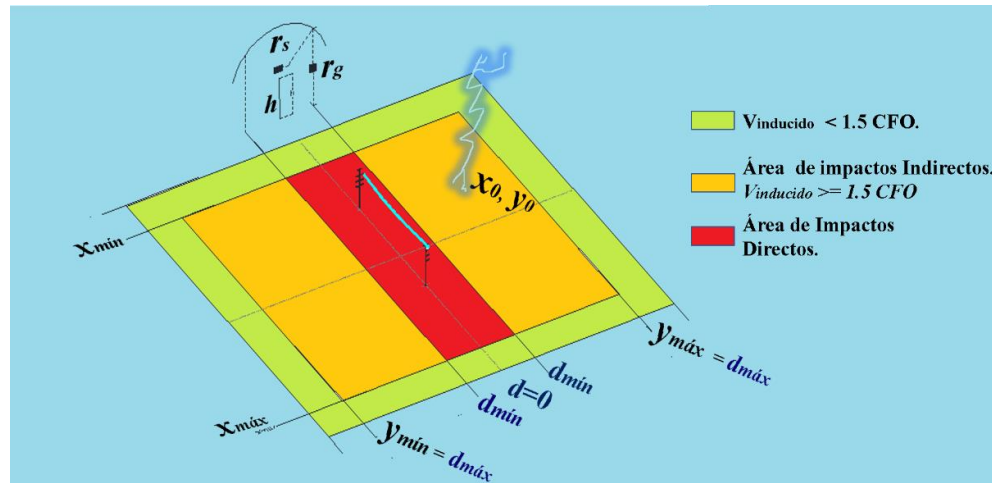
$I_0$ : corriente pico de la primera descarga del retorno (kA).

$A$ : área donde se generan los impactos indirectos (km<sup>2</sup>).

<sup>74</sup> OpCit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>75</sup> *Ibíd.*

Figura 22. Uso del método electrométrico para determinar las descargas indirectas<sup>76</sup>.



4. Se calcula la probabilidad de ocurrencia de rayo teniendo en cuenta la altura sobre el nivel del mar “z” de la línea de distribución, suponiendo que el sistema de distribución esté tendido en un sistema montañoso. Este parámetro sigue una densidad de probabilidad exponencial como se muestra en la ecuación (0.39).

$$f(z) = \begin{cases} 1000.2 * 10^{-3} e^{-915.89 * 10^{-6} * z}, & 73 < z < 4200 \\ 0, & z \geq 4200 \\ 0, & z < 73 \end{cases} \quad (0.39)$$

**Paso 2.** Para cada impacto indirecto seleccionado en el ítem anterior, se calcula la tensión inducida en la línea teniendo en cuenta la topografía del terreno, por medio de los códigos FDTD – 3D implementados<sup>77</sup> en FORTRAN. Se realizan  $n_{tot}$  de simulaciones para estimar el comportamiento del sistema en el tiempo.

**Paso 3.** Se cuenta el número “n” de eventos en los que la tensión inducida por los impactos indirectos es superior al nivel de aislamiento de la línea (CFO).

<sup>76</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>77</sup> Ver descripción de los códigos en el capítulo 2 del presente documento. Los códigos para el cálculo de tensiones inducidas son adjuntos a este documento.

Generalmente se usa la tensión crítica de descarga disruptiva (*Critical Flashover Voltage, CFO*)<sup>78,79</sup>.

Finalmente, se calcula el índice de fallas  $F_p$  con la (0.40)<sup>80,81</sup>.

$$F_p = \frac{n}{n_{tot}} N_g \times A \quad (0.40)$$

$$N_g = DDT(z)$$

$$DDT(z) = \begin{cases} 10.221e^{-0.00095z} & , 0 < z < 1000 \\ 10.221e^{-0.00095z} + 0.64 \left( \frac{z}{1925.901} \right) & , 1000 < z < 2000 \\ 10.221e^{-0.00095z} + 0.20 \left( \frac{z}{1925.901} \right) & , z > 2000 \end{cases}$$

Dónde

$F_p$ : es número de flameos/km-año de las líneas de distribución.

$N_g$ : densidad de descargas a tierra, tomada de la sección 4.7.

$A$ : es el área de simulación.

$n_{tot}$  : es el número total de impactos generados aleatoriamente en la zona

$n$  : números de impactos en la zona de interés (zona de impactos indirectos).

Terminado el proceso se pueden realizar las gráficas que relacionen el índice de fallas con el CFO y variar parámetros como la resistencia de puesta a tierra, conductividad del terreno, cantidad de descargadores de sobretensión en una longitud concreta. Por ejemplo, la figura 5.2 tomada de<sup>82</sup> muestra la variación de la tasa de fallas considerando diferentes conductividades del terreno. De manera que la visualización de los parámetros involucrados permita realizar ajustes en el diseño, mantenimiento y coordinación de protecciones contra rayos.

<sup>78</sup> Opcit A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone

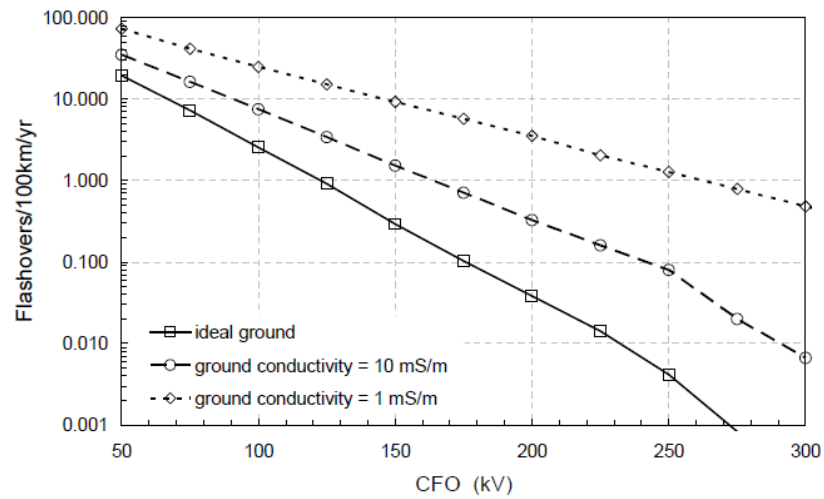
<sup>79</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>80</sup> Opcit A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone

<sup>81</sup> Opcit. Institute of Electrical and Electronics Engineers

<sup>82</sup> Ibid

Figura 23. Comparación de la tasa de fallas para diferentes conductividades del suelo y de resistencia a tierra.



Fuente: A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone

## 6. CONCLUSIONES

Se comprobó que para la ejecución del mismo algoritmo que FORTRAN es aproximadamente nueve veces más rápido que Matlab, satisfaciendo las expectativas esperadas en la ejecución del algoritmo. Sin embargo, esta ventaja puede ser afectada por las técnicas de programación implementadas y por el rendimiento propio del equipo.

Al realizar la implementación del código FDTD-3D, se realizó un trabajo adicional para lograr la completa traducción del código de Matlab a Fortran. Esto se debió a que en el código original se utilizaron funciones de Matlab que no se encuentran disponibles en Fortran. En consecuencia, se hizo necesario reconstruir parte del código, de manera que de igual manera que el algoritmo original<sup>83</sup>.

Se encuentran notables diferencias en la cantidad de descargas a tierra en los años analizados. Esto es posiblemente esté relacionado con las perturbaciones atmosféricas y climatológicas presentadas en el país durante cada año. Para los tres años analizados, las descargas a tierra aumentaron año tras año mientras que el promedio de precipitación anual descendió y la temperatura media aumentó<sup>84</sup> [38]. Acorde con la idea presentada se puede deducir que no siempre el aumento de las descargas a tierra viene acompañado de temporadas de lluvia, de forma particular en el año 2014 se dio inicio a la temporada seca del fenómeno del niño<sup>85</sup>.

La densidad de descargas a tierra disminuye a medida que aumenta la altitud en las zonas de estudio. En contraste, estudios similares realizados en Europa sugieren

---

<sup>83</sup> OpCit E. A. Soto Ríos, PhD. Thesis "

<sup>84</sup> Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres, «fenómeno el niño, Análisis Comparativo 1997 -1998 // 2014 - 2016,» © Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres., Bogotá, 2016.

<sup>85</sup> *Ibíd.*

que la densidad de rayos a tierra aumenta en relación con la altitud<sup>86</sup>. Se puede especular que este comportamiento notablemente distinto esté ligado a las condiciones climáticas. El continente europeo es considerado de clima templado, y Colombia se encuentra en una zona tropical.

Para la zona montañosa estudiada se obtuvieron las funciones de probabilidad de impactos de rayo. Junto con la función usada Borgueti, Nucci y Paolone permite estimar la probabilidad de impacto en el dominio espacial que se desee analizar. Acorde con la muestra de datos analizados y mostrados en las figura, para el sector analizado se puede afirmar que:

- a) El 25% de los rayos tienen su incidencia en altitudes inferiores a los 300 msnm.
- b) El 50% de las descargas a tierra tienen incidencia en altitudes superiores a 700 msnm, la mitad de estos hasta 1500 msnm.

Debido a que la tasa de fallas calculada con la ecuación (0.40) es proporcional a la densidad de descargas a tierra, podría esperarse que para la región de estudio la tasa de fallas disminuya a medida que aumenta la altitud promedio de la ubicación de la línea de distribución. Conocer el índice de fallas por descargas atmosféricas en relación a las variables topográficas, como la altitud, permitirá realizar una adecuada ubicación de los equipos de protección y descargadores de sobretensión en el diseño del sistema eléctrico. Conocer la relación del índice de fallas con el CFO permitirá predecir resultados de comportamiento del sistema frente a las descargas eléctricas y tomar decisiones acertadas en relación con el mantenimiento y diseño de los sistemas de distribución.

---

<sup>86</sup> A. Smorgonskiy, F. Rachidi, M. Rubinstein y G. Diendorfer, «On the relation between lightning flash density and terrain elevation,» de International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, 2013.

La metodología propuesta permite complementar estándar IEEE-1410 en lo referente al cálculo del índice de fallas porque incluye efectos ligados a la altitud en la que se encuentra instalada la línea de distribución.

## 7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A corto plazo, se hace necesario implementar la metodología para obtener datos en perspectiva del rendimiento de las líneas de distribución frente a los rayos para posteriormente verificar la metodología con datos reales.

Puede considerarse utilizar programación paralela con procesadores GPU para simulaciones en Matlab; estas implementaciones podrían tener un rendimiento similar a simulaciones implementadas en Fortran.

Se recomienda caracterizar los parámetros de incidencia del rayo (corriente máxima y tiempo de frente.) en relación al gradiente topográfico<sup>87,88</sup> y parámetros de rugosidad del terreno porque estos inciden en la circulación atmosférica global, el desarrollo de tormentas y los flujos turbulentos<sup>89</sup>.

Surge la posibilidad de establecer relación entre los fenómenos climatológicos globales y la cantidad de descargas a tierra. Particularmente su concordancia con la temperatura media y pluviosidad.

---

<sup>87</sup> A. Smorgonskiy, F. Rachidi, M. Rubinstein y G. Diendorfer, «On the relation between lightning flash density and terrain elevation,» de International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, 2013.

<sup>88</sup> E. Soto, Estudio de las Tensiones Inducidas por Rayos en Redes de Distribución Aéreas Ubicadas sobre Terrenos no Planos., 2015.

<sup>89</sup> M. M. Santana, Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales, Granada, 2011.

## BIBLIOGRAFÍA

A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone, «An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 22, nº 1, pp. 684-692, 2007.

A. Borghetti, C. A. Nucci y M. Paolone, «Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 19, nº 3, pp. 1400-1410, 2004.

A. Faghfour, W. Kinsner y D. Swatek, «Comparison of entropy-based characterization of lightning strike maps using planar and spherical coordinates,» de Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatoon, 2005.

A. Faghfour, W. Kinsner y D. Swatek, «Comparison of entropy-based characterization of lightning strike maps using planar and spherical coordinates,» de Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Sask, 2005.

A. Schneider, «gpsvisualizer,» Adam Schneider, 2003. [En línea]. Available: [http://www.gpsvisualizer.com/map?uploaded\\_file\\_1=&format=google&convert\\_for\\_mat=&form=google](http://www.gpsvisualizer.com/map?uploaded_file_1=&format=google&convert_for_mat=&form=google).

A. Smorgonskiy, F. Rachidi, M. Rubinstein y G. Diendorfer, «On the relation between lightning flash density and terrain elevation,» de International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, 2013.

C. A. García Montoya y J. A. Girón Pérez, «Performance of overhead distribution networks in EPM front of lightning induced overvoltages: a case of study,» de Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America, Medellín, 2014.

C. A. Nucci y F. Rachidi, «Lightning-Induced Overvoltages,» de IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session, New Orleans, 1999.

CNES, Airbus, Digital Globe y Landsat, «<https://www.google.com/maps/>,» Google, (s.f). [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/@7.2512737,-72.9899873,18504a,35y,37.22t/data=!3m1!1e3>. [Último acceso: 2018].

D. Aranguren, J. López, J. Inampué, H. Torres y H. D. Betz, «Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography,» de International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, 2014.

D. Li, M. Azadifar, M. Rubinstein, M. Paolone, D. Pavanello, S. Metz, Q. Zhang y Z. Wang, «On Lightning Electromagnetic Field Propagation Along an Irregular Terrain,» IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, vol. 58, nº 1, pp. 161-171, 1 february 2016.

D. M. SULLIVAN, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, Piscataway: IEEE Press Wiley, 2013.

E. A. Soto Ríos, PhD. Thesis "Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non- flat terrains", Manizales, 2014.

E. A. Soto Rios y E. Pérez, «Lightning induced voltages on an distribution network over an inclined terrain,» de 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, 2011.

E. Atef Z. y V. Demir, The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB (R) Simulations, United States of America: SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC, 2008.

E. Ioh, «The ideal HPC,» acmqueue, 2010.

E. P. González, avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes DE DISTRIBUCIÓN, Bogotá D.C, Colombia, 2006.

E. Soto , C. Younes y E. Pérez, «Influence of Non Flat Terrain on Ligthing Induced Voltage in Distribution Networks,» de International Conference on Ligthing Protection (ICLP), Viena, Austria, 2012.

E. Soto, E. Pérez y J. Herrera, «Electromagnetic Field Due to Lightning Striking on Top of a Cone-Shaped Mountain Using the FDTD,» IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, vol. 56, nº 5, pp. 1112-1120, 2014.

E. Soto, Estudio de las Tensiones Inducidas por Rayos en Redes de Distribución Aéreas Ubicadas sobre Terrenos no Planos., 2015.

G. M. Quetglás, Fundamentos de Informática y Programación.

H. C. M. S. Cruz, Programando en Fortran, 2007.

H. Torres, El rayo. Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Bogotá: UNIBIBLOS, 2002. Institute of Electrical and Electronics Engineers, «IEEE Std 1410 - 2010. IEEE Guide for Improving he Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution lines,» vol. 2010, 2011.

intel.com, «software.intel.com,» [En línea]. Available: <https://software.intel.com/en-us/get-started-with-fortran-compiler-18.0-for-windows-parallel-studio-xe-2018>.

[Último acceso: 7 11 2018].

J. Backus, «THE HISTORY OF FORTRAN I, II, AND III,» de Fortran Session, 2014.

J. Kinlay , «jonathankinlay.com,» 24 02 2015. [En línea]. Available: <http://jonathankinlay.com/2015/02/comparison-programming-languages/>. [Último acceso: 15 10 2017].

J. Reese y S. Zaranek, «GPU Programming in MATLAB,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/gpu-programming-in-matlab.html>.

K. L. Monti, «Folded Empirical Distribution Function Curves-Mountain Plots,» The American Statistician, vol. 49, n° 4, pp. 342-345, Noviembre 1995.

K. S. Yee, «Numerical Solution of initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media,» IEEE Transactions On Antennas and Propagation, pp. 302-307, 1966.

Keraunos S.A.S., Identificación y Análisis de los Niveles de Calidad del Servicio Alcanzables en las Redes de Distribución de Energía Eléctrica del SIN, Taller., Bogotá, 2014.

KERAUNOS, «Keraunos science of lightning,» 2017. [En línea]. Available: <http://keraunos.co/index.php/es-co/pages-3-es-co>.

L. Code, «Free version,» [En línea]. Available: <http://www.liov.ing.unibo.it/>.

M. Á. Jurado Machado, Analisis del comportamiento de la lineas aereas de distribucion frente al rayo, 2013.

M. M. Santana, Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales, Granada, 2011.

Manufacturing Terms, «Manufacturing Terms, Definition at a click away,» Manufacturing Terms, [En línea]. Available: <https://www.manufacturingterms.com/Spanish/Probability-Density-Function.html>. [Último acceso: 25 07 2018].

N. I. Petrov, G. N. Petrova y F. D'Alessandro, «Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach,» IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, nº 4, pp. 641-654, 2003.

P. Gómez y E. González, Las ecuaciones de Maxwell.

Real Academia Española, «<http://dle.rae.es>,» © Real Academia Española,, 2018. [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/?id=GjpDTiC>. [Último acceso: 2018 07 25].

S. D. Jiménez Rodríguez, relación entre descargas eléctricas atmosféricas a tierra y fallas en líneas de transmisión y distribución de energía - operador centrales eléctricas de norte de Santander Colombia, Bogotá, Colombia, 2016.

S. Zhang, T. Ding y Q. Wu, «Analysis of lightning-induced electromagnetic fields near rugged terrain in cylindrical coordinates,» de 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Beijing, China, 2010.

Scitools, «ScitoolsUnderstand,» scitools, 2017. [En línea]. Available: <https://scitools.com/trial-download-3/>.

T. Radcliffe, «activestate.com,» 01 09 2016. [En línea]. Available: <https://www.activestate.com/blog/2016/09/python-vs-cc-embedded-systems>. [Último acceso: 15 10 2017].

U. O. d. Catalunya, «<http://informatica.blogs.uoc.edu>,» 24 10 2011. [En línea]. Available: <http://informatica.blogs.uoc.edu/2011/10/24/el-lenguaje-de-programacion-mas-eficiente/>. [Último acceso: 15 10 2017].

Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres, «fenómeno el niño, Análisis Comparativo 1997 -1998 // 2014 -2016,» © Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres., Bogotá, 2016.

Universidad Internacional de Valencia, «universidadviu,» 21 01 2017. [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.es/lenguaje-alto-nivel-los-mas-utilizados/>. [Último acceso: 15 10 2017].