



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

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

**Sebastián Darío Jiménez Rodríguez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Bogotá, Colombia

2016



# **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**

**Sebastián Darío Jiménez Rodríguez**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Eléctrica**

Director:

Horacio Torres Sánchez (Ingeniero Electricista, Msc, Ph.D)

Codirector:

Edison Soto Ríos (Ingeniero Electricista, Msc, Ph.D.)

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Bogotá, Colombia

2016







*Doy gracias a Dios por permitirme realizar este trabajo que dedico a mis padres por su amor, educación basada en valores, ejemplo de responsabilidad, dedicación, compromiso e incondicional apoyo en todas las etapas de mi vida, y a mis hermanos por su compañía y alegría durante el transcurrir de mi vida.*



## **Agradecimientos**

A mis padres Clara y Darío por su amor incondicional, necesario y fundamental en cada logro alcanzado en mi vida.

A mis hermanos Daniel y Melissa por su alegría, charlas, diversión y tiempo compartido en cada instante de mi vida.

A mi primo Alejandro por sus incondicionales consejos y apoyo desde la distancia.

A Horacio Torres, quien despertó en mi el interés por los temas de investigación relacionados con rayos. Alguien por el que siento un gran respeto y admiración, por su inteligencia, carisma y personalidad. Por sus asesorías como director de esta tesis y por la confianza depositada en mi para sacar este trabajo adelante.

A Edison Soto por toda su colaboración, ayuda y comprensión como codirector en cada etapa de esta tesis de maestría. Por las interesantes y productivas charlas que tuvimos sobre la vida, el país y la ingeniería. Alguien de quién he aprendido un sinnúmero cosas importantes para mi vida.

A Daniel Arangüen, por sus valiosas aportes en la construcción de la propuesta de la maestría y posterior desarrollo de la tesis de maestría.

A Diana Cely por su amistad y ser el vínculo inicial con KERAUNOS, a partir del cual ha surgido este proyecto.

A KERAUNOS, Jesús, Juan Carlos y Alejandro por todo el apoyo y colaboración brindada en la investigación de actividad de tormenta en Norte de Santander.

A la Universidad Nacional de Colombia y al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Facultad de Ingeniería de Bogotá, alma máter de mi formación integral como persona y profesional.

## Resumen

El presente es un trabajo investigativo que determina la diferencia de las tensiones inducidas en líneas de aéreas de distribución de energía que recorren terreno montañoso (no-plano), respecto a los valores obtenidos al asumir una típica aproximación de terreno plano. Este trabajo busca contribuir en el mejoramiento de los sistemas de protección contra rayos para los operadores de red en Colombia, considerando que los rayos por impactos directos o indirectos, son los causantes de cerca del 70% de las fallas que ocurren en los circuitos aéreos de distribución. Se realizan simulaciones de tramos de líneas en Norte de Santander considerando únicamente el trazado e incluyendo también transformadores y descargadores de sobretensión, concluyendo en la necesidad de considerar en las simulaciones de diseño características propias de cada circuito tales como trazado, topografía real de la zona, elementos de circuito y parámetros físicos del terreno como conductividad.

**Palabras clave:** Tensión inducida por rayo, terreno plano, terreno no-plano, campo electromagnético

## Abstract

This is a research project which determines the difference of the voltages induced in overhead distribution lines of energy that cross mountainous terrain (non-flat), compared to the values obtained when it's assuming a typical approach of flat terrain. This work aims to contribute to the improvement of lightning protection systems for network operators in Colombia, considering that the lightning are responsible for about 70% of faults that occur in distribution circuits caused by direct or indirect strokes. Initially the simulations consider only the paths of Norte de Santander distribution lines and then the transformers and surge arresters are included. At the end it's possible to conclude that is necessary to consider in the design simulations, the features of each circuit such as path, the real topography of the area, circuit elements and physical parameters such as conductivity of the ground.

**Keywords:** Lightning induced voltage, non-flat terrain, flat terrain, electromagnetic field.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>21</b>
<b>1. Cálculo de tensiones inducidas por rayo</b> .....	<b>25</b>
1.1 Metodología para la estimación de tensiones inducidas .....	25
1.2 Cálculo del campo electromagnético .....	26
1.2.1 Técnicas analíticas.....	26
1.2.2 Ecuaciones simplificadas .....	30
1.2.3 Soluciones numéricas .....	33
1.3 Modelos de corriente de retorno .....	35
1.4 Modelos de acople.....	37
1.5 Metodología de tensiones inducidas para terreno no plano .....	39
1.5.1 Modelo de línea de transmisión.....	40
1.5.2 Modelo de conductor delgado .....	41
<b>2. Actividad de rayos en Norte de Santander</b> .....	<b>43</b>
2.1 Redes de localización .....	43
2.2 Red LINET .....	45
2.2.1 Eficiencia de la Red .....	49
2.3 Densidad de descargas a tierra .....	50
2.3.1 Mapa de DDT en Norte de Santander .....	50
2.3.2 Línea de transmisión .....	51
2.3.3 Circuitos de distribución .....	54
<b>3. Tensiones inducidas sobre líneas aéreas para terreno plano y no-plano</b> .....	<b>58</b>
3.1 Casos de Simulación .....	59
3.1.1 Tramo El Tarra: .....	60
3.1.2 Tramo Consal - San Pablo: .....	69
3.1.3 Tramo Consal -Teora: .....	79
<b>4. Tensiones inducidas para terreno plano y no plano incluyendo elementos de circuito</b> .....	<b>85</b>
4.1 Casos de Simulación .....	85
4.1.1 Tramo El Tarra: .....	86
4.1.2 Tramo Consal - San Pablo: .....	94

---

4.1.3	Tramo Consal -Teora:.....	102
4.2	Impactos cercanos - Tramo El tarra.....	107
4.2.1	Impacto 4.....	108
4.2.2	Impacto 5.....	111
4.2.3	Impacto 6.....	114
4.2.4	Impacto 7.....	118
4.2.5	Impacto 8.....	121
4.2.6	Impacto 9.....	124
4.2.7	Impacto 10.....	128
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros.....</b>	<b>133</b>
5.1	Conclusiones.....	133
5.1.1	Tensiones inducidas en redes aéreas.....	133
5.1.2	Tensiones inducidas en redes aéreas incluyendo transformadores y descargadores de sobretensiones .....	135
5.2	Trabajos futuros .....	138
<b>A.</b>	<b>Anexo: Modelos y ecuaciones de elementos.....</b>	<b>141</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>145</b>

# Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1 Geometría y sistema de coordenadas para los puntos de campo y de fuente usados en la solución con el vector de potencial .....	28
Figura 1-2 Configuración para el cálculo del campo electromagnético .....	31
Figura 1-3 Esquema de conductor delgado. Tomado de [50] .....	41
Figura 1-4 Aproximación escalera de una línea recta. Tomado de [50] .....	42
Figura 2-1 Red de localización RECMA [52].....	44
Figura 2-2 Sistema de Información de Descargas Atmosféricas– SID (a) [52] Red de localización de rayos LINET (b).....	45
Figura 2-3 Detección de rayos Red LINET. Descargas nube-tierra (rojo). Descargas intra-nube (amarillo) .....	46
Figura 2-4 Red de detección de rayos - LINET en Colombia. Tomado de [55] .....	47
Figura 2-5 Perfil de altitud a lo largo de las líneas de base en el área central de la red LINET. Tomado de [55] .....	48
Figura 2-6 DDT para Norte de Santander - Red LINET .....	51
Figura 2-7 DDT en región línea de transmisión .....	52
Figura 2-8 Ubicación geográfica Línea de transmisión .....	53
Figura 2-9 Tramo El Tarra. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b). .....	54
Figura 2-10 Tramo Consal - San Pablo. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b). .....	55
Figura 2-11 Tramo Consal - Teora. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b).....	56
Figura 3-1 Configuración terreno no-plano (a) y terreno plano (b). Tramo El Tarra. Impacto 1 .....	61
Figura 3-2 Tensiones inducidas terreno no-plano tramo El Tarra. Impacto 1 .....	62
Figura 3-3 Respuesta terreno plano tramo El Tarra. Impacto 1 .....	62
Figura 3-4 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b)Tramo El Tarra. Impacto 2 .....	64
Figura 3-5 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra. Impacto 2.....	65
Figura 3-6 Tensiones inducidas para terreno plano tramo El Tarra. Impacto 2.....	65
Figura 3-7 Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra. Impacto 3... ..	67
Figura 3-8 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra. Impacto 3.....	67
Figura 3-9 Tensiones inducidas para terreno plano. Tramo El Tarra. Impacto 3.....	68
Figura 3-10 Configuración terreno no-plano Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1 ...	70

Figura 3-11 Respuesta terreno no-plano tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1 .....	71
Figura 3-12 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1 .....	71
Figura 3-13 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2.....	73
Figura 3-14 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2.....	73
Figura 3-15 Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 2.....	74
Figura 3-16 Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3.....	76
Figura 3-17 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3.....	76
Figura 3-18 Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3.....	77
Figura 3-19 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1 .....	80
Figura 3-20 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1 .....	80
Figura 3-21 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1 .....	81
Figura 3-22 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2 .....	82
Figura 3-23 Tensiones inducidas terreno no-plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2 .....	83
Figura 3-24 Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2 .....	83
Figura 4-1 Configuración terreno no-plano (a) y terreno plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1.....	87
Figura 4-2 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1.....	87
Figura 4-3 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1 .....	88
Figura 4-4 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2.....	89
Figura 4-5 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2 .....	90
Figura 4-6 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2 .....	90
Figura 4-7 Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3.....	92
Figura 4-8 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3 .....	92

Figura 4-9 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3 .....	93
Figura 4-10 Configuración terreno no-plano Consal-San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1 .....	95
Figura 4-11 Respuesta terreno no-plano tramo Consal-San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1 .....	95
Figura 4-12 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1 .....	96
Figura 4-13 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2 .....	97
Figura 4-14 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo con elementos. Impacto 2 .....	98
Figura 4-15 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo con elementos. Impacto 2 .....	98
Figura 4-16 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3 .....	100
Figura 4-17 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3 .....	100
Figura 4-18 Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3 .....	101
Figura 4-19 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1 .....	103
Figura 4-20 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 1 .....	103
Figura 4-21 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 1 .....	104
Figura 4-22 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2 .....	105
Figura 4-23 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 3 .....	106
Figura 4-24 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 3 .....	106
Figura 4-25 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 4 .....	108
Figura 4-26 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 4 .....	109
Figura 4-27 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 4 .....	109
Figura 4-28 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 4 .....	110
Figura 4-29 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 5 .....	111
Figura 4-30 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 5 .....	112
Figura 4-31 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 5 .....	112
Figura 4-32 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 5 .....	113
Figura 4-33 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 6 .....	115
Figura 4-34 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 6 .....	115

Figura 4-35 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 6 .....	116
Figura 4-36 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 6 ....	117
Figura 4-37 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 7 .....	118
Figura 4-38 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 7 .....	119
Figura 4-39 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 7 .....	119
Figura 4-40 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 7 ....	120
Figura 4-41 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 8 .....	121
Figura 4-42 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 8 .....	122
Figura 4-43 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 8 .....	122
Figura 4-44 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 8 ....	123
Figura 4-45 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 9 .....	125
Figura 4-46 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 9 .....	125
Figura 4-47 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 9 .....	126
Figura 4-48 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 9 ....	127
Figura 4-49 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 10 .....	128
Figura 4-50 Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 10 .....	129
Figura 4-51 Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 10 .....	129
Figura 4-52 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 10...	130
Figura 5-1 Modelo del Transformador considerando efectos capacitivos para comportamientos transitorios de alta frecuencia .....	141
Figura 5-2 Modelo línea de distribución .....	141
Figura 5-3 Modelo del descargador de sobretensiones .....	141
Figura 5-4 Características estáticas de los elementos no lineales del modelo del descargador de sobretensión .....	142
Figura 5-5 Fuente de corriente implementada en no-plano .....	142

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 3-1: Altura de nodos tramo El Tarra .....	60
Tabla 3-2: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 1.....	63
Tabla 3-3: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 2.....	66
Tabla 3-4: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 3.....	68
Tabla 3-5: Altura nodos tramo Consal-San Pablo (Teorama) .....	70
Tabla 3-6: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 1 ....	72
Tabla 3-7: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 2 ....	74
Tabla 3-8: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3 ....	77
Tabla 3-9: Altura de nodos tramo Consal - Teora.....	79
Tabla 3-10: Tensiones inducidas tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1 ....	81
Tabla 3-11: Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2 .....	84
Tabla 4-1: Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 1.....	88
Tabla 4-2: Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 2.....	91
Tabla 4-3: Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 3.....	93
Tabla 4-4: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1 .....	96
Tabla 4-5: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 2 .....	99
Tabla 4-6: Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 3 .....	101
Tabla 4-7: Tensiones inducidas tramo Consal - Teora (San Calixto) con elementos. Impacto 1 .....	104
Tabla 4-8: Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 2 .....	107
Tabla 4-9: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 4.....	110
Tabla 4-10: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 5 .....	113
Tabla 4-11: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 6 .....	116
Tabla 4-12: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 7 .....	120
Tabla 4-13: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 8 .....	123
Tabla 4-14: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 9 .....	126
Tabla 4-15: Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 10 .....	130



## ***Introducción***

El presente trabajo final surge por el gusto personal que encuentra el autor en los temas relacionados con las descargas eléctricas atmosféricas. El admirar el fenómeno tan espectacular que se presenta en el momento de la descarga con el destello de luz, sonido y energía, genera una motivación por estudiar dichos fenómenos atmosféricos. Desde hace varias décadas, el grupo de investigación PAAS – UN, ha enfocado sus esfuerzos en realizar investigaciones sistemáticas sobre el fenómeno del rayo y sus implicaciones en sistemas de potencia a través de trabajos de maestría y doctorado. Este trabajo se incluye dentro de este grupo de investigaciones. El autor encuentra además interesante e importante su estudio al estar relacionados gran medida con la ocurrencia de accidentes que ponen en riesgo la vida de las personas, así como también daños en infraestructuras eléctricas que impiden el suministro normal del servicio de energía o la pérdida de equipos eléctricos y electrónicos vulnerables ante la ocurrencia de estos fenómenos, y que representan pérdidas económicas de gran cuantía. En esta oportunidad el estudio estará encaminado hacia los efectos que se producen sobre las redes eléctricas cuando se produce una descarga eléctrica atmosférica.

Las empresas de distribución de energía eléctrica en Colombia, cuentan con líneas de transmisión y redes de distribución de energía que se ven frecuentemente afectadas por los rayos. Colombia debido a su ubicación geográfica intertropical, es uno de los países que presenta una de las más altas densidades de descargas a tierra registradas a nivel mundial. Al año caen cerca de 8 millones de rayos, siendo abril, mayo, octubre y noviembre, los meses que registran mayor número de descargas [1]. Estas cifras alertan sobre el nivel de riesgo y el grado de amenaza que representan los rayos a la infraestructura eléctrica del país. En relación a esto se ha observado que los rayos pueden causar la salida de las líneas y fallas de los equipos de forma directa y en forma indirecta. El primer caso, menos frecuente pero con mayor peligro, ocurre cuando la descarga cae directamente sobre las líneas de transmisión o distribución. En este caso la línea recibe bruscamente una tensión muy elevada produciendo descargas a tierra a

través de los postes o del cable de guarda. El segundo se refiere a descargas cercanas a las líneas que producen sobretensiones que viajan a través de las líneas afectando los equipos conectados a la red. Estas sobretensiones alcanzan valores que dañan el aislamiento eléctrico y ocasionan la salida de las líneas. Hay que considerar además que la mayoría de las líneas en el país son áreas, lo que hace más susceptible de daños por descargas atmosféricas.

Cada año los operadores de red del sistema interconectado reportan miles de fallas en sus circuitos y equipos, relacionadas con sobretensiones causadas por las descargas a tierra. En respuesta a los daños, las empresas distribuidoras deben invertir una gran cantidad de recursos para el mantenimiento y reparaciones de la red eléctrica y los equipos que la conforman. Aunque esta problemática viene de muchos años atrás, en los últimos años el número de transformadores dañados por causa de sobretensiones generadas por descargas atmosféricas ha ido creciendo de forma alarmante. Se estima que en promedio de empresa, el número de transformadores quemados está entre 600 y 2000 al año, lo cual indicaría que anualmente en Colombia se averían alrededor de 15000 transformadores [2].

Los operadores de red que operan en zonas de alta densidad de descargas a tierra como al Norte de los departamento de Antioquia y Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander registran en promedio una duración entre 6 y 8 meses de sus transformadores, los cuales están diseñados para cumplir una vida útil de alrededor de 15 años. La causa asociada a los daños, sobretensiones por rayos. De acuerdo con registros históricos de la Empresa de Energía de Bogotá, en 1987 el 5,1% de los transformadores instalados en zona urbana y rural que corresponden respectivamente a 530 y 570 unidades fallaron [2]. El origen de la falla en al menos el 34% de los casos se debió a sobretensiones aun cuando el 83% de los transformadores tenía instalados descargadores de sobretensiones y el 95% estaban correctamente aterrizados. Para la época el costo que asumió la EEB en la reposición de los transformadores fallados estuvo alrededor de 1 millón de dólares. Hoy en día con el crecimiento progresivo de la red y el incremento en el número de equipos que se requiere para operar el sistema en Colombia, estos costos de reposición alcanzan 40 millones de dólares. En 1996 la zona rural a cargo de Codensa que atendía 94 municipios de Cundinamarca, tenía instalados 15.083 transformadores, de los cuales fallaron 1.549 es decir cerca del 10%. Estos

equipos se encontraban instalados en zonas de alta densidad de descargas en su mayoría en Pacho y Rionegro, además la mayoría de las fallas se presentaron en los meses que históricamente registran periodos de lluvia prolongados y actividad de tormenta (abril-mayo, octubre)[3].

Estos reportes indicarían una relación existente entre la avería de transformadores, daño de equipos y salinas de las líneas, con las descargas atmosféricas. Por esta razón resulta pertinente simular las descargas de rayo ante los trazados reales de líneas de distribución de un operador de red, teniendo en cuenta la topografía del terreno y los elementos de circuito. Adicionalmente se realizarán las mismas simulaciones considerando terreno plano, lo cual permitirá establecer qué tanto cambian las tensiones inducidas cuando se considera la topografía en el trazado del circuito. Los resultados proporcionarán un conocimiento que ayude a mejorar los sistemas de protección de las líneas de distribución de nuestro país, que por la naturaleza de la geografía del territorio colombiano ameritan un estudio más detallado al de una aproximación a terreno plano.

En el desarrollo de este trabajo se estudiarán líneas del operador de red Centrales Eléctricas de Norte de Santander, del cual se dispone información básica de los circuitos. Adicionalmente los circuitos de este operador se encuentran ubicados en el departamento de Norte de Santander, una de las zonas con mayor densidad de descargas a tierra - DDT. La elaboración del mapa de densidad se realizará por medio de los datos históricos de descargas de la red de localización de rayos LINET-Colombia, y permitirá identificar circuitos con un nivel significativo de descargas y que adicionalmente tengan una topografía en relieve. Así mismo se realizarán simulaciones de casos en los que el trazado de la línea se encuentre sobre terreno plano, rodeado por un terreno montañoso para obtener resultados de tensiones inducidas para diferentes configuraciones.

Cabe destacar que este tipo de simulaciones no se han hecho hasta ahora, posiblemente por la complejidad que resulta el desarrollo de ecuaciones diferenciales en los modelos de simulación. Por esto, para el desarrollo de este trabajo final, se hará uso de un programa de simulación de tensiones inducidas para terreno plano conocido como Yaluk Draw [4, 5] desarrollado por Pérez y el código de simulación de tensiones inducidas para terreno no-plano desarrollado por el Co-director de esta tesis[6][7]. Con el presente

trabajo se busca además complementar el desarrollo del código, con la inclusión de elementos de circuito como transformadores y descargadores de sobretensión en la simulación de terreno no-plano, para obtener resultados más aproximados a lo que se tendría en un caso real.

El trabajo se divide en cinco capítulos. El primer capítulo describe una recopilación teórica de metodologías para la estimación de tensiones inducidas, cálculo de campos electromagnético y los modelos de corriente de retorno y acople. El segundo capítulo presenta la caracterización de la actividad de tormenta en Norte de Santander, específicamente en la zona donde se concentran los circuitos aéreos sobre terreno montañoso. El tercer capítulo expone las simulaciones de tensiones inducidas en terreno plano y no-plano, considerando únicamente el trazado del circuito. El cuarto capítulo presenta las simulaciones de tensiones inducidas incluyendo elementos de circuito tales como transformadores y descargadores de sobretensión, para terreno plano y terreno no-plano. El quinto capítulo presenta las conclusiones a partir de los resultados obtenidos, aportes realizados y futuros trabajos.

# 1. Cálculo de tensiones inducidas por rayo

En el presente capítulo se describen algunas de las metodologías que han sido desarrolladas a lo largo del tiempo, relacionadas con el cálculo de tensiones inducidas producidas por la descarga de retorno de un rayo sobre líneas aéreas. Se presentan técnicas analíticas y numéricas de cálculo del campo electromagnético, se describe la metodología utilizada para el cálculo de la corriente de retorno y las metodologías de cálculo de tensiones inducidas para terreno plano y no plano. Se hará énfasis en los métodos y metodologías utilizadas por los programas Yaluk Draw desarrollado por *Pérez* [5, 7] y código de simulación para terreno no-plano desarrollado por *Soto* [6], publicados en revistas internacionales por el grupo de investigación PAAS, por sus importantes aportes al conocimiento e investigación sobre rayos y que serán utilizados en el desarrollo de este trabajo.

## 1.1 Metodología para la estimación de tensiones inducidas

Los primeros estudios sobre tensiones inducidas relacionadas con rayos, indicaban que la carga electrostática acumulada en las nubes de tormenta producía la inducción en las líneas de distribución, una vez se producía la descarga y la carga desaparecía instantáneamente. Posteriormente *Wagner* y *MaCann* afirmaron que las tensiones inducidas eran provocadas principalmente por el campo electromagnético producido por la corriente de retorno [8], considerando además que la variación de la carga no es instantánea. Actualmente ésta es la teoría más aceptada por la comunidad académica internacional, por lo cual se ha profundizado en la investigación científica para describir y modelar la descarga de retorno y el campo electromagnético de manera que se aproxime cada vez más al fenómeno real. Paralelo a estas investigaciones, se ha estudiado el

acople del campo electromagnético producido por el rayo y las líneas aéreas de energía. Se destacan principalmente dos metodologías: la primera desarrollada a partir de la teoría de antenas y el tratamiento riguroso de las ecuaciones de *Maxwell*, y la segunda por medio de una aproximación de la línea de transmisión. El primer modelo que utilizó la aproximación de la línea de transmisión para describir la inducción electromagnética en una línea de distribución producida por la descarga de retorno de rayo, fue desarrollado por Rusck [9]. Autores como *Agrawal* [10], *Price* y *Gurbaxani*, *Taylor*, *Scatterwhite* y *Harvison*, *Rachidi* y *Chowdhuri*, han desarrollado otros modelos de acople basados en la aproximación de líneas de transmisión, sin embargo el más aceptado por su facilidad en la implementación y validación experimental de los resultados es el modelo de *Agrawal*.

En la actualidad, el cálculo de tensiones inducidas sigue la siguiente metodología:

- Adoptar un modelo para describir la corriente de la descarga de retorno a lo largo del canal en función de la altura y el tiempo.
- Con base en la corriente de retorno, se calcula el campo electromagnético producido por esta corriente a lo largo de la línea de distribución.
- Con el campo electromagnético calculado a lo largo de la línea, se usa un modelo de acople para calcular la tensión inducida por este campo en la línea.

## 1.2 Cálculo del campo electromagnético

### 1.2.1 Técnicas analíticas

El cálculo analítico de campos eléctricos y magnéticos puede realizarse a partir de tres aproximaciones que son aplicables para cualquier línea de distribución de energía. Las dos primeras técnicas que se destacan y que son ampliamente utilizadas son la técnica del monopolo (ecuación de continuidad) y la técnica del dipolo (condición de *Lorentz*). Para el cálculo del campo, la técnica del monopolo requiere conocer la densidad de carga y la densidad de corriente (espacio-temporal). Por su parte la técnica del dipolo solo requiere conocer la densidad de corriente de la fuente en función del tiempo y el espacio. La tercera técnica se basa en una transformada matemática que relaciona la densidad de carga y retardos en corriente que vería un observador en el punto de cálculo [11]. Las tres técnicas utilizan las ecuaciones de *Maxwell* en su desarrollo, sin embargo

consideran expresiones diferentes en el cálculo de las componentes individuales de campo eléctrico. Las ecuaciones de *Maxwell* para un medio lineal, isotrópico, homogéneo e invariante en el tiempo son:

$$\nabla \cdot E = \rho/\varepsilon \quad (1-1)$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0 \quad (1-2)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1-3)$$

$$\nabla \times H = J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1-4)$$

Los campos pueden ser expresados en términos escalares y vectoriales, facilitando la resolución de las ecuaciones cuando las fuentes son conocidas [12]. Así entonces:

$$E = -\nabla\varphi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1-5)$$

$$\mu H = \nabla \times A \quad (1-6)$$

Los potenciales se relacionan por medio de la condición de *Lorentz*:

$$\nabla \cdot A + \mu\varepsilon \frac{\delta\varphi}{\delta t} = 0 \quad (1-7)$$

Así las ecuaciones de *Maxwell* en términos de potenciales se expresan como:

$$\nabla^2 A - \mu\varepsilon \frac{\delta^2 A}{\delta t^2} = -\mu J \quad (1-8)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu\varepsilon \frac{\delta^2 \varphi}{\delta t^2} = -\rho/\varepsilon \quad (1-9)$$

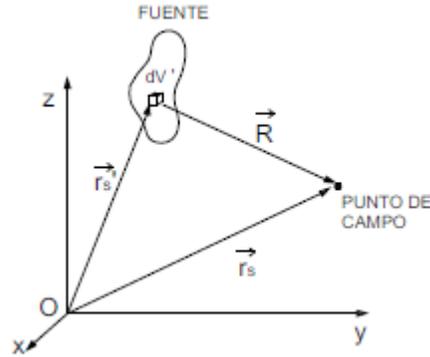


Figura 1-1 Geometría y sistema de coordenadas para los puntos de campo y de fuente usados en la solución con el vector de potencial

Para la configuración mostrada en la Figura 1-1, las soluciones para un medio no homogéneo son:

$$A(r_s, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{J(r'_s, t - \frac{|r_s - r'_s|}{c})}{|r_s - r'_s|} dV' \quad (1-10)$$

$$\varphi(r_s, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{\rho(r'_s, t - \frac{|r_s - r'_s|}{c})}{|r_s - r'_s|} dV' \quad (1-11)$$

## Técnica del monopolo

La técnica de monopolo considera los siguientes pasos [11]:

- Se especifica la densidad de corriente  $J$  o la densidad lineal de carga  $\rho$ .
- Teniendo la densidad  $J$  (o  $\rho$ ), por medio de la ecuación de continuidad se encuentra  $\rho$  (o  $J$ ).
- Se utiliza  $J$  para encontrar  $A$  y  $\rho$  para encontrar  $\varphi$ .
- Conociendo  $A$  y  $\rho$ , se calcula el campo eléctrico  $E$ .
- El campo magnético  $B$  se calcula usando  $A$ .

Por medio de la ecuación de continuidad se obtiene la densidad de carga:

$$\nabla \cdot J + \frac{\delta \rho}{\delta t} = 0 \quad (1-12)$$

Se calculan los potenciales y los campos con las ecuaciones (1-5), (1-6), (1-10) y (1-11). En esta técnica la fuente es descrita en términos de la densidad de corriente y la densidad de carga, y las ecuaciones de campo son expresadas en términos de la densidad de carga y densidad de corriente.

## Técnica del dipolo

La técnica del dipolo establece los siguientes pasos [11]:

- Se especifica la densidad de corriente  $J$ .
- Se utiliza  $J$  para encontrar el vector potencial  $A$ .
- Se usa  $A$  y la condición de *Lorentz* para encontrar el potencial escalar  $\varphi$ .
- Usando  $A$  y  $\varphi$ , se calcula el campo eléctrico  $E$ .
- El campo magnético  $B$  se calcula usando  $A$ .

En esta técnica la fuente es descrita solo en términos de la densidad de corriente y las ecuaciones de campo son expresadas solo en términos de la corriente. El uso de la condición de *Lorentz* elimina la necesidad de especificar la densidad de carga. El potencial vectorial magnético en términos de la corriente sería:

$$dA(r_s, t) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{i \left( t - \frac{R}{c} \right)}{R} dz' \quad (1-13)$$

y el potencial escalar  $\varphi$ , en términos de  $A$ :

$$\varphi(r_s, t) = -\frac{1}{\mu\epsilon} \int_{-\infty}^t \nabla \cdot A dt' + \varphi \quad (t = -\infty) \quad (1-14)$$

Reemplazando las ecuaciones (1-13) y (1-14) en (1-5), y siguiendo el procedimiento descrito en [13] se obtiene:

$$dE = dE_r a_r + dE_z a_z \quad (1-15)$$

$$dE_r = \frac{dz'}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_{-\infty}^t i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (1-16)$$

$$dE_z = \frac{dz'}{4\pi\epsilon} \left[ \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_{-\infty}^t i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (1-17)$$

$$dH_\phi = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} + \frac{r}{R^3} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) \right] dz' \quad (1-18)$$

### 1.2.2 Ecuaciones simplificadas

Las expresiones para el cálculo del campo electromagnético producido por rayo a lo largo de una línea, fueron presentadas originalmente por *Master* y *Uman* [13]. Se consideró un dipolo finito de longitud  $dz'$  a una altura  $z'$  sobre el terreno plano, asumiendo este como un conductor perfecto. La configuración se puede observar en la Figura 1-2. Asumir el terreno como un conductor perfecto es una buena aproximación para la componente horizontal del campo magnético y la componente vertical del campo eléctrico, para distancias cortas [14]. Para distancias mayores debe considerarse la conductividad del terreno que afecta la componente horizontal del campo eléctrico [15].

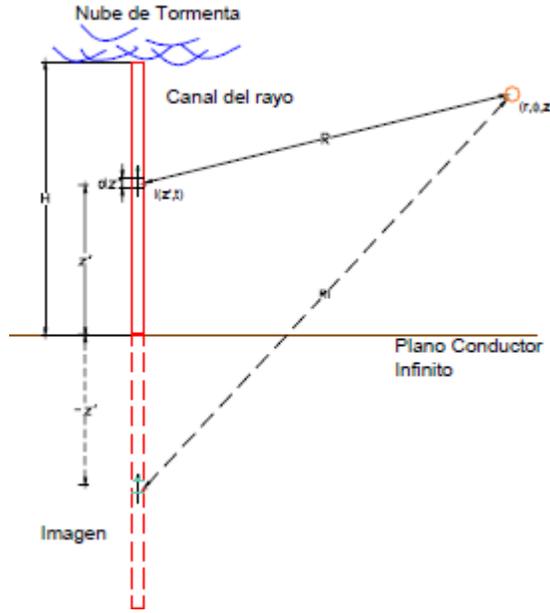


Figura 1-2 Configuración para el cálculo del campo electromagnético

Con base en la técnica de dipolo descrita en la sección 1.2.1, se desarrollaron las ecuaciones de campo eléctrico y campo magnético. La ecuación de campo eléctrico tiene tres componentes: el campo electrostático, el campo inducido y el campo eléctrico radiado, como se muestra en las ecuaciones (1-19) y (1-20). El campo magnético está compuesto por el campo magnético inducido y el campo radiado, como se muestra en la ecuación (1-21).

$$dE_r = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau - \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (1-19)$$

$$dE_z = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) d\tau - \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (1-20)$$

$$dB_{\varphi} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{r}{R^3} i \left( z', t - \frac{R}{c} \right) + \frac{r}{cR^2} i \frac{\partial i \left( z', t - \frac{R}{c} \right)}{\partial t} \right] dz' \quad (1-21)$$

donde:

$z$  : altura del punto de medición del campo.

$z'$  : altura de la fuente de corriente.

$R$  : Distancia entre la fuente y el punto de observación.

$r$  : Distancia entre la base del canal y el punto de observación

$\varepsilon_0$  permitividad en el vacío  $\frac{10^{-9}}{36\pi} \left[ \frac{A.S}{V.m} \right]$

$\mu_0$  = permeabilidad en el vacío  $4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$

$c$  = velocidad de la luz en el vacío  $3 \cdot 10^8 [m/s]$

$i \left( z', t - \frac{R}{c} \right)$ : Corriente a lo largo del canal

Las ecuaciones anteriores son válidas para configuraciones de terreno perfectamente conductor. Si se considera la conductividad del terreno, las ecuaciones de campo electromagnético demandan un tratamiento más complejo y tiempos de computación extensos por lo cual se requiere utilizar una aproximación para su cálculo. Puede recurrirse entonces a la aproximación planteada por *Cooray* y *Rubinstein* [16, 17], que calcula de forma adecuada el campo eléctrico horizontal, considerando la conductividad del terreno y los cambios de polaridad para el campo calculado, para distancias cercanas (cien metros), intermedias (ciertos kilómetros) y lejanas (mayor a diez kilómetros). La ecuación se presenta a continuación:

$$E_r(r, z, jw) = E_{rp}(r, z, jw) - H_{\varphi p}(r, z = 0, jw) \cdot \frac{(1 + j)}{\sigma \delta} \quad (1-22)$$

donde

$p$  : subíndice que representa el cálculo considerando la conductividad infinita

$\delta$ : Factor de penetración  $= \sqrt{2/(w\mu_g\sigma)}$

$\mu_g$ : permeabilidad del terreno

$\sigma$ : conductividad del terreno

$E_{rp}(r, z, jw)$  y  $H_{\phi p}(r, z = 0, jw)$  son las transformadas de *Fourier* de las componentes horizontales del campo eléctrico a una altura  $z$  y de la componente acimutal del campo magnético a nivel del suelo respectivamente, ambos calculados asumiendo un terreno perfectamente conductor [18].

*Thottappillil* y *Rakov* compararon los campos electromagnéticos por rayo obtenidos para tres aproximaciones, la técnica del dipolo y dos versiones de la técnica del monopolo [11]. Los resultados arrojaron que el campo eléctrico total era el mismo en los tres casos, sin embargo, cada componente de campo conocida: electrostático, inducción y radiación, es diferente para cada técnica. *Thottappillil* derivó una fórmula que permite calcular el campo eléctrico y magnético debido a la descarga de retorno, con una velocidad igual a la velocidad de la luz [19]. Las expresiones se presentan en (1-23).

$$\begin{aligned} E_z(d, t) &= \frac{I(0, t - d/c)}{2\pi\epsilon_0 cd} \\ H_\phi(d, t) &= \frac{I(0, t - d/c)}{2\pi d} \end{aligned} \tag{1-23}$$

$c$ : velocidad de la luz

### 1.2.3 Soluciones numéricas

Para calcular las tensiones inducidas en las redes de distribución, es necesario resolver las ecuaciones (1-19), (1-20) y (1-21) en el dominio del tiempo. Existen varios métodos numéricos para el cálculo del campo electromagnético producido por rayo. Los más conocidos son el método de los momentos (MOM) [20, 21], el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) [22, 23, 24] y el método de elementos finitos (FEM)[25, 26]. El método de los momentos se ha usado para resolver las integrales del campo electromagnético producidas por un canal de rayo inclinado y su efecto en las tensiones inducidas en redes de distribución, y análisis de corrientes de rayo para estructuras de gran altura[7]. El método FDTD lo usó Yee para la solución de las ecuaciones de *Maxwell*, haciendo una gran contribución para la resolución de problemas de electromagnetismo en aplicaciones como: dispersión de ondas (*wave scattering*) electromagnéticas en el dominio del tiempo y la frecuencia, interacción electromagnética

con tejidos biológicos, acoplamiento de pulsos electromagnéticos, diseño de circuitos de microondas, cálculo de tensiones inducidas en redes de distribución, entre otras [27].

Por otra parte *Storari* y *Cardoso*, aplicaron el método FDTD al cálculo de campos electromagnéticos en el dominio del tiempo producidos por rayo, proponiendo un método híbrido para calcular el impulso electromagnético por rayo (LEMP - Lightning Electromagnetic Pulse) [22]. Este método consiste en obtener la densidad de flujo magnético a través de una fórmula analítica para una corriente tipo escalón. Luego esta densidad de flujo magnético se utiliza para calcular el campo eléctrico a través de las ecuaciones del método FDTD. Esta metodología plantea diferencias con la convencional planteada por Yee dado que los valores de  $B$  se obtienen previamente, por tanto  $E$  y  $B$  no se calculan en pasos de tiempos medios alternadamente. El método híbrido permite también que los campos electromagnéticos se calculen sin necesidad de enmallar toda la región [28].

*Yang* presentó las ecuaciones del método FDTD en coordenadas cilíndricas en 2D para encontrar el campo electromagnético producido por una descarga vertical [23]. Posteriormente estas ecuaciones fueron utilizadas por otros autores. *Mimouni et al* calcula el campo electromagnético bajo diferentes profundidades de un terreno considerando diferentes conductividades [29] y los campos electromagnéticos producidos en cercanías de una torre impactada por rayo, sobre y por debajo de un terreno con conductividad finita [30]. El método FDTD en 3D ha sido utilizado para calcular campos electromagnéticos y tensiones inducidas por rayo [31, 32]. *Soto* desarrolló códigos de simulación implementando el método FDTD en 3D en coordenadas cartesianas, incluyendo ciertas modificaciones para obtener una mejor aproximación cuando se considera estructuras más complejas (terreno montañoso) y la conductividad finita del terreno [6]. En la validación del código demostró que la simulación de una descarga de retorno del rayo inclinada es igual a la de un terreno inclinado. Cabe aclarar que dicha aproximación es válida sólo cuando el impacto del rayo está en el medio de la montaña inclinada (o en la ladera de la montaña). Si el impacto es en la parte superior de la montaña, es necesario utilizar otra aproximación.

### 1.3 Modelos de corriente de retorno

Para el cálculo del campo electromagnético es necesaria una expresión que describa la corriente de descarga de retorno a lo largo del canal del rayo. A lo largo del tiempo han sido desarrollados diferentes modelos que pueden clasificarse en los siguientes grupos: modelos de dinámica de gases, parámetros distribuidos, modelos de ingeniería y modelos electromagnéticos [33]. Los modelos de ingeniería son los más utilizados en el cálculo de tensiones inducidas por rayos. Estos se basan en la descripción de la corriente a lo largo del canal  $i(z', t)$ , en relación a la corriente en la base del canal  $i(0, t)$ , dado que la corriente en la base del canal es la única que puede ser medida y por consiguiente de la que se tienen registros. Algunos de estos modelos son: el modelo de *Bruce Golde* (BG) [34], el modelo de *Diendorfer y Uman* (DU) [35], el modelo de línea de transmisión (TL) [36, 37], el modelo Modificado de Línea de Transmisión (MTL) [38, 39], el modelo de Corriente Viajera (TCS) [40] y el modelo de *Cooray* [17]. Los modelos DU y de *Cooray* se enfocan en la física de la descarga requiriendo un análisis más complicado y con variables más difíciles de medir.

Los modelos más utilizados en el cálculo de tensiones inducidas han sido el modelo TL, MTL, TCS y DU. La comparación realizada por *Thottappillil y Uman* [41] entre estos cuatro modelos y mediciones de campos electromagnéticos sobre descargas iniciadas artificialmente, muestra que los modelos TL y MTL arrojan menores errores absolutos que los modelos TCS y DU.

El modelo TL asume que la corriente asciende por la base del canal como si se tratara de una línea de transmisión sin pérdidas a una velocidad  $v$ , como se muestra en la ecuación (1-24).

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

$$i(0, t) = 0 \quad z > vt$$

(1-24)

donde

$v$  : velocidad de la descarga de retorno.

$z'$ : altura a lo largo del canal

El modelo MTL realiza una modificación al modelo TL considerando que existe una disminución en la corriente a medida que esta se desplaza a lo largo del canal, para considerar el efecto de la distribución vertical de la carga producida por el corona del líder. Esta disminución puede ser lineal (modelo MTLL) [38], o exponencial (MTLE) [39]. El modelo MTLE es el modelo más utilizado - ecuación (1-25).

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

$$i(0, t) = 0 \quad z > vt$$

(1-25)

donde

$v$ : velocidad de la descarga de retorno.

$\lambda$ : constante de decaimiento

$z'$ : altura a lo largo del canal

La corriente en la base del canal es típicamente representada por la expresión de *Heidler* [42] presentada en la ecuación (1-26), que considera directamente los tiempos de frente y de cola, tiene su derivada en  $t=0$  y es la que mejor se aproxima a las datos experimentales:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)}$$

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

(1-26)

donde

$\eta$ : factor de corrección de amplitud.

$I_0$ : amplitud de la corriente en la base del canal.

$\tau_1$ : constante de tiempo de frente

$\tau_2$ : constante de tiempo de cola

$n$ : exponente entre 2 y 10

## 1.4 Modelos de acople

Para describir la interacción del campo electromagnético producido por la descarga de retorno en las redes de distribución, se utiliza la aproximación de línea de transmisión con fuentes distribuidas, que es la utilizada en diferentes modelos de acople.

El modelo de línea de transmisión (TL) supone que la dimensión de la sección transversal de la línea es eléctricamente pequeña, por lo que se asume que la propagación se produce sólo a lo largo del eje de la línea. Adicionalmente la aproximación TL considera que la respuesta de la línea es de modo cuasi-transversal electromagnético (cuasi-TEM), y que la sección transversal de la línea es más pequeña que la longitud de onda más significativa, es decir, que el campo electromagnético a lo largo de la línea está limitado al plano transversal y perpendicular a la línea de eje. Por último la aproximación TL asume que la suma de las corrientes de línea en cualquier sección transversal es cero, es decir, el suelo y los conductores de referencia son el camino de regreso para las corrientes de los "n" conductores.

*Rusck* fue uno de los primeros que desarrolló un modelo para describir la inducción en la línea producida por el campo electromagnético asociado a la descarga de retorno basado en la teoría de línea de transmisión [9]. Posteriormente otros autores desarrollaron otros modelos de acople basados también en TL. Entre los más conocidos se encuentran los realizados por: *Agrawal*, *Price* y *Gurbaxani* [10], *Chowdhuri* y *Gross* [43], *Taylor*, *Scatterwhite* y *Harvison*[44] y *Rachidi* [45]. *Rusck* propuso una fórmula analítica para el cálculo del valor máximo de la tensión inducida en el punto de la línea más cercano a la ubicación de la descarga. Se aplica para el caso de una línea de longitud infinita sin pérdidas sobre un suelo perfectamente conductor, y asumiendo el canal de rayo vertical:

$$V_0 = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left[ 1 + \frac{v}{\sqrt{2c^2 - v^2}} \right] \quad (1-27)$$

donde

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cong 30 \Omega$$

$h$  : Altura de la línea [m]

$I_0$  : Amplitud de la corriente de retorno asumida como función paso [kA]

$y$  : Distancia a la ubicación de la descarga [m]

$v$ : velocidad de la descarga de retorno [m/ $\mu$ s]

$c$ : velocidad de la luz [m/ $\mu$ s]

Esta ecuación es muy utilizada por su simplicidad, sin embargo dado las consideraciones que hace, su uso es limitado para redes de distribución complejas pues pueden obtenerse errores en las estimaciones.

Los modelos de *Agrawal et al.*, *Rachidi y Taylor et. al.*, describen igual el acople electromagnético del campo producido por la descarga y la línea. Estos modelos se diferencian principalmente en la forma en que expresan las ecuaciones de línea de transmisión. En el modelo de *Agrawal et al.* se expresa en función de corriente inducida total y la tensión dispersa (*scattered*), y considera la componente de campo eléctrico horizontal como única fuente de inducción en la línea. En el modelo de *Rachidi* se expresa en función de la corriente dispersa (*scattered*) y la tensión total, y considera la componente del campo magnético tangencial a la línea como única fuente de inducción. En el modelo de *Taylor et al.* se expresa en función de la corriente total y la tensión total, y se considera como fuentes de inducción el campo eléctrico vertical y la componente transversal del campo magnético [46, 47]. Actualmente, el modelo de *Agrawal et al.* es el más utilizado, en particular por dos razones. En primer lugar, debido a que los términos fuente están dados por el campo eléctrico horizontal a la línea y su evaluación no requiere integración o diferenciación. La segunda razón se debe a que los términos de la fuente se expresan de la misma manera cuando se considera la conductividad del terreno. Además, este método ha sido validado experimentalmente con éxito. El modelo está expresado mediante dos ecuaciones de línea de transmisión, formulado mediante la tensión inducida dispersa (*scattered*) y como única fuente de inducción la componente de campo eléctrico horizontal. Las expresiones pueden verse en las ecuaciones (1-28) y (1-29) descritas en función de la frecuencia.

$$\frac{dV^s(x)}{dx} + Z'[I(x)] = E_x(x, h) \quad (1-28)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + Y'V^s(x) = 0 \quad (1-29)$$

Donde:

$V^s$ : es la tensión inducida dispersa.

$I$ : es la corriente en la línea.

$Z'$ : es la impedancia en la línea.

$Y'$ : es la admitancia en la línea.

En las simulaciones de terreno plano, dado que la línea se encuentra paralela a la superficie de la tierra, es posible utilizar la teoría de circuitos de parámetros distribuidos, utilizando el modelo de de *Agrawal* para describir el acoplamiento entre campo electromagnético del rayo y la línea de distribución área. Este modelo es implementado por el programa de simulación *Yaluk Draw* desarrollado por *Pérez y Soto* [26, 5]. Éste programa se utilizará en el presente trabajo para realizar las simulaciones de tensiones inducidas en redes de distribución sobre terreno plano.

## 1.5 Metodología de tensiones inducidas para terreno no plano

En trabajos de investigación desarrollados por autores como *Thottappill, Uman*[41], *Nucci y Rachid*[47], se han realizado diferentes comparaciones entre métodos de cálculo de campo electromagnético, modelos de acople y metodologías de tensiones inducidas. *Soto* [6] comparó dos metodologías de FDTD para calcular tensiones inducidas en terreno plano y no plano: 1) El modelo de línea de transmisión (Transmission Line Model - TLM) 2) El modelo de conductor delgado (Thin Wire Model - TWM). *Soto* concluyó que el modelo de línea de transmisión no es válido para simulaciones de tensiones inducidas para terreno no plano al obtener cambios de polaridad de la tensión en el medio y al final de la línea en las simulaciones de tensiones inducidas. Esto posiblemente se debe a que el modelo TLM considera aproximaciones en teoría de circuitos que resultan no válidas. De acuerdo a esos resultados, el cálculo de tensiones inducidas para terreno no plano son desarrollados por el método de conductor delgado mediante códigos de simulación desarrollados por *Soto*. A continuación se describen las dos metodologías.

### 1.5.1 Modelo de línea de transmisión

El modelo de línea de transmisión (Transmission Line Model - TLM) utiliza el modelo de acople de *Agrawal* [10] (basado en la aproximación de línea de transmisión) para calcular tensiones inducidas, y el método FDTD-3D para calcular campos electromagnéticos. El conjunto de ecuaciones del modelo de línea de transmisión para el modelo de acople de *Agrawal* son [48]:

$$\frac{\partial}{\partial x} [V_i^s(x, t)] + [R_{ij}] [I_i(x, t)] + [L_{ij}] \frac{\partial}{\partial t} [I_i(x, t)] = [E_x^e(x, h_p, t) - E_x^e(x, h_p, t)] \quad (1-30)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [I_i(x, t)] + [C_{ij}] \frac{\partial}{\partial t} [V_i^s(x, t)] = 0 \quad (1-31)$$

donde  $[V_i^s(x, t)]$  está relacionado con  $[V_i(x, t)]$  mediante la siguiente ecuación:

$$[V_i^s(x, t)] = [V_i(x, t)] - [V_i^e(x, t)] \quad (1-32)$$

$$\text{donde } [V_i^e(x, t)] = - \int_0^{h_p} E_z^e(x, 0, t) = -h_p E_z^e(x, 0, t) \quad (1-33)$$

Las condiciones de frontera, para las terminaciones de línea resistivas son:

$$[V_i^s(x_0, t)] = -[R_0][I_i(x_0, t) + [h_p]E_z^e(x_0, 0, t)] \quad (1-34)$$

$$[V_i^s(x_L, t)] = -[R_L][I_i(x_L, t) + [h_p]E_z^e(x_L, 0, t)] \quad (1-35)$$

donde:

$V_i^s(x, t)$ : tensión dispersa

$V_i^e(x, t)$ : tensión incidente

$[h_p]$ : altura del conductor p sobre el terreno

$[L_{ij}]$ : matriz de inductancias de línea por unidad de longitud

$[C_{ij}]$ : matriz de capacitancias de línea por unidad de longitud

$[R_{ij}]$ : matriz de resistencias transitorias de línea tierra

$[R_0], [R_L]$ : matrices de resistencias en las terminaciones de la línea

Estas ecuaciones se resuelven por el método de diferencias finitas [10]. Ahora bien, para el cálculo de tensiones inducidas en *terreno no plano*, el método de línea de transmisión requiere ciertas modificaciones. El campo eléctrico vertical  $E_z$  se calcula para cada celda debajo de la línea y se integra como la ecuación (1-33), sin asumir (como para terreno plano) que el campo eléctrico vertical es constante por debajo de la línea, y la tensión se aproxima como la multiplicación del campo  $E_z$  por la altura de la línea de  $h_p$  ( $[V_i^e(x, t)] = -h_p E_z^e(x, 0, t)$ ). El campo eléctrico tangencial  $E_t$  a la línea se calcula como el campo de acoplamiento para el modelo de acople de *Agrawal*.

### 1.5.2 Modelo de conductor delgado

El modelo de conductor delgado (Thin Wire Model - TWM), consiste en el cálculo tanto de los campos electromagnéticos como de tensiones inducidas por medio de un método numérico, sea el método de diferencias finitas FDTD [32] o el método de elementos finitos [25]. Este modelo TWM considera un conductor cuyo radio es más pequeño que el tamaño de la celda de la simulación FDTD [41]. Algunas metodologías simplificadas del modelo de conductor delgado como la presentada por *Umashankar* [49], no permite la representación exacta de la impedancia característica de la línea. Por esta razón se hace necesario el uso de un modelo más exacto como el desarrollado por *Noda* [50]. En este método, los campos eléctricos a lo largo de la línea son llevados a cero y los parámetros de permitividad ( $\epsilon$ ) y permeabilidad ( $\mu$ ) alrededor del conductor, se van actualizando de manera diferente que el resto del espacio de simulación. Esto puede observarse más claramente en la Figura 1-3.

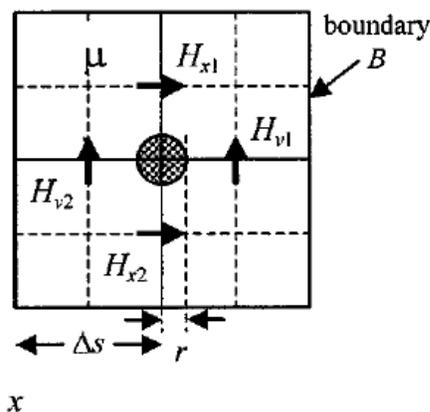


Figura 1-3 Esquema de conductor delgado. Tomado de [50]

Los parámetros  $\mu$  y  $\varepsilon$  se actualizan de acuerdo a:

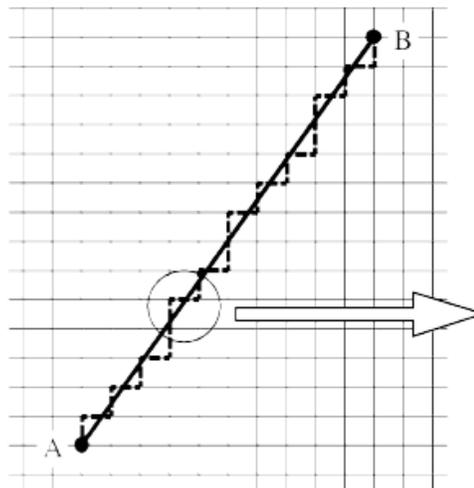
$$\mu_m = \frac{\mu_0}{m}, \quad \varepsilon_m = m\varepsilon_0, \quad m = \frac{1.471}{\ln\left(\frac{\Delta_s}{r}\right)} \quad (1-36)$$

donde:

$\Delta_s$ : paso de celda de simulación

$r$ : radio del conductor

Cuando las líneas no son horizontales, estas se discretizan por medio de un algoritmo escalera [50], como se muestra en la Figura 1-4. La discretización de la línea ocasiona un retraso en la velocidad de propagación a lo largo de la línea en comparación con un conductor inclinado, sin embargo, las tensiones inducidas a lo largo de la línea no se ven afectadas.



**Figura 1-4** Aproximación escalera de una línea recta. Tomado de [50]

Los códigos de simulación para terreno no plano desarrollados por *Soto* que consideran el modelo de conductor delgado tanto para el cálculo del campo electromagnético debido a la descarga de retorno como para el cálculo de las tensiones inducidas sobre la línea, serán utilizados en este trabajo para realizar las simulaciones en líneas reales de distribución considerando la topografía y características del terreno. Cabe resaltar que estos códigos de simulación fueron validados teórica y experimentalmente por *Soto* en [6].

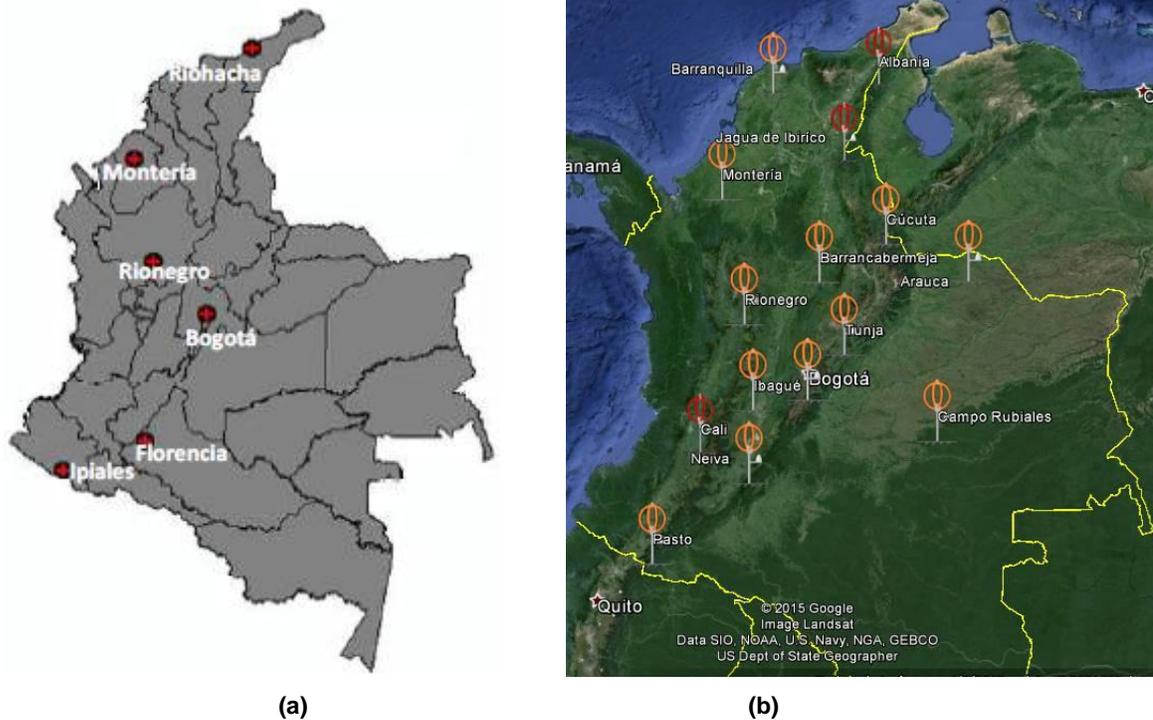
## 2. Actividad de rayos en Norte de Santander

Con el propósito de encontrar la relación entre las fallas de líneas de aéreas y la caída de rayos además de considerar en el análisis características como configuración de la línea, la topografía del terreno, la inclusión de elementos propios del circuito, entre otros, es necesario realizar la caracterización de la actividad de tormenta en la región geográfica donde se ubican los circuitos, como herramienta para una selección representativa de los tramos de circuito a simular. Dicha caracterización se puede hacer mediante un mapa de densidad de descargas a tierra, a partir de los datos recogidos por redes de localización de rayos que permiten ubicar la descarga con una precisión adecuada. En este capítulo se presentan las redes de localización existentes en Colombia, el mapa de densidad de descargas a tierra para la región de Norte de Santander y la caracterización de los circuitos.

### 2.1 Redes de localización

En Colombia, el primer sistema de localización de rayos instalado fue la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosférica – RECMA. Este sistema fue adquirido por la empresa Interconexión Eléctrica S.A - E.S.P – ISA en el año 1995, que contó con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia. La red RECMA la conformaban seis sensores de baja frecuencia y tecnología *LPATS – Lightning Position and Tacking System*, que fueron distribuidos en el territorio Colombiano como se muestra en la Figura 2-1. Adicionalmente, se instalaron en conjunto con la RECMA, cinco dispositivos LLP – *Lightning Location and Protection*, instalados en la región andina de Colombia. Esto fue posible gracias a la colaboración de las Empresas Publicas de Medellín – EPM. Finalmente el conjunto de sensores y dispositivos LLP conformaron el primer sistema de medición indirecta de rayos en Colombia [51]. La red estuvo en operación entre 1997 y 2001.





**Figura 2-2** Sistema de Información de Descargas Atmosféricas– SID (a) [52] Red de localización de rayos LINET (b)

En 2011 entró en operación en Colombia la red Europea LINET. Esta es una tecnología de detección de actividad total de rayos (rayos intra-nube y nube-tierra). Inicialmente contaba con seis sensores ubicados en Bogotá, Ibagué, Tunja, Rio Negro, Barrancabermeja y Montería. En marzo de 2012 la red fue ampliada a 9 estaciones incluyendo sensores en Campo Rubiales, Cúcuta y Barranquilla. En enero de 2013 se instaló una décima estación en Pasto. La localización de los sensores puede observarse en la Figura 2-2 (b). Desde su instalación septiembre de 2011 hasta la fecha la red ha detectado cerca de 64'000.000 de descargas. La red LINET es la fuente de información a partir de la que se construirá el mapa de densidad de descargas a tierra, por lo cual se describirá en detalle.

## 2.2 Red LINET

La técnica de detección de la red LINET fue presentada por Betz et al [53, 54] en el año 2004. Esta técnica está basada en medidas de las radiaciones VLF (Very Low Frequency) y LF (Low Frequency) producidas por rayos, con las cuales se hace un análisis de soluciones en 3D a partir del método de detección TOA (Time Of Arrival). La técnica utiliza un algoritmo que proporciona no sólo información sobre la posición

horizontal (latitud, longitud) de los eventos de rayos observados, sino también de su posición vertical. LINET es sensible a las señales VLF/LF para descargas nube-tierra (CG:cloud-to-ground) e intranube (IC: in-cloud). Para las descargas CG supone que las emisiones de radiación surgen desde el punto de impacto en la tierra. Para las descargas IC, los puntos de origen del canal VLF/LF son desconocidos en la mayoría de los casos, excepto cuando se encuentra dentro de nubes convectivas. La Figura 2-3 muestra un ejemplo de una tormenta severa observada por los sensores de LINET. Los puntos rojos corresponden a impactos en el terreno debidos a descargas nube-tierra (CG), mientras que los puntos amarillos muestran la ubicación y alturas de descargas intra-nube (IC).

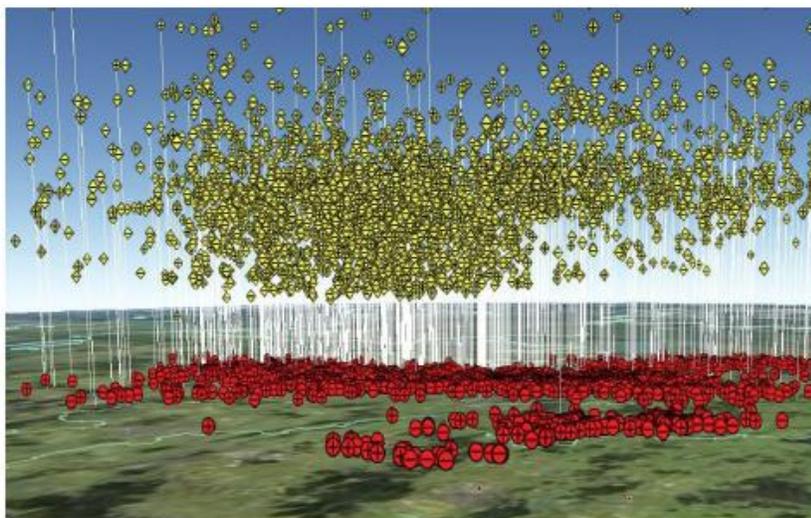
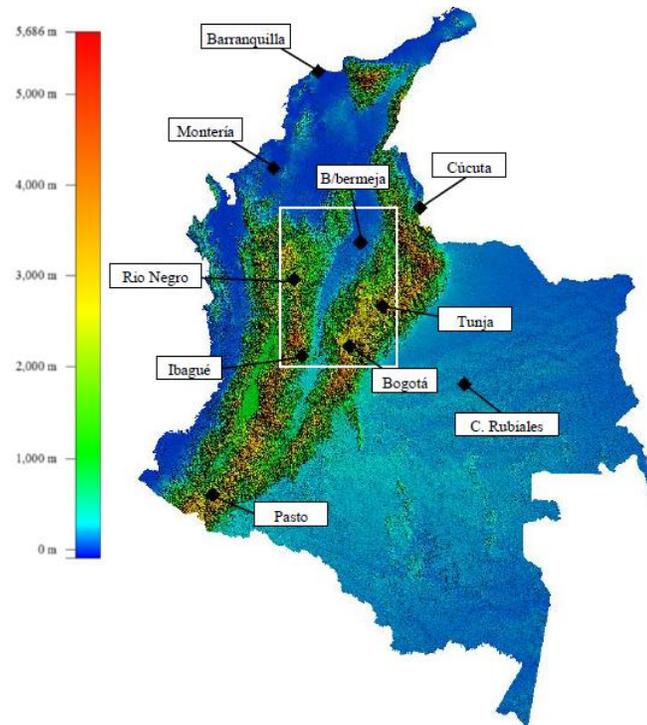


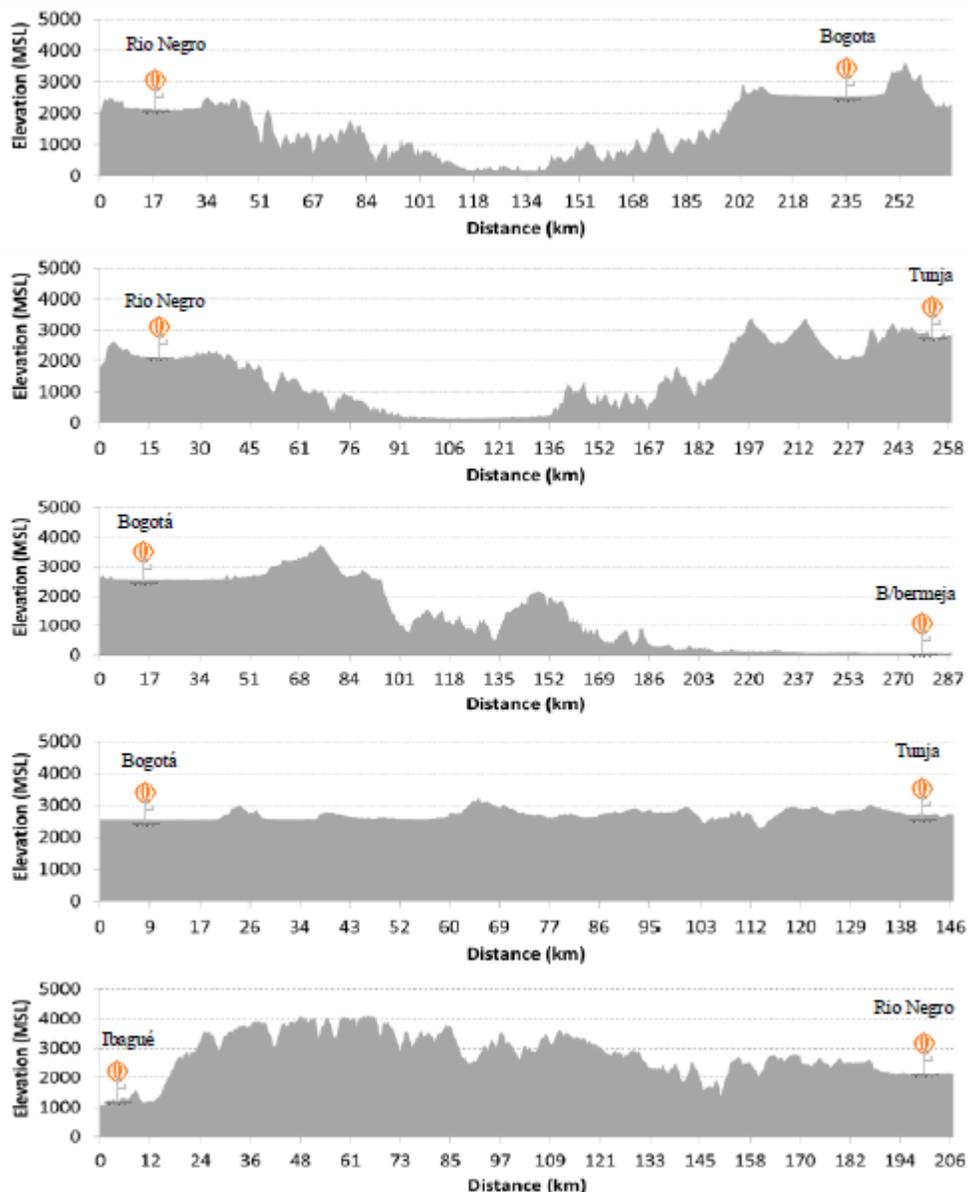
Figura 2-3 Detección de rayos Red LINET. Descargas nube-tierra (rojo). Descargas intra-nube (amarillo)

Las descargas IC y CG se pueden discriminar por medio de la técnica TOA-3D cuando la línea de base entre los sensores se encuentran a distancias menores a 250 km[53]. Entre los años 2011 y 2013 se instalaron diez sensores de campo magnético (VLF/LF) en Colombia, logrando una cobertura superior al 80% del territorio. Debido a la variable topografía del territorio colombiano, los sensores se encuentran instalados en altitudes de 0 a 2800 msnm. Las distancias de líneas de base entre sensores varían desde 120 km hasta 420 km. En la Figura 2-4 se muestra el área donde la red tiene su mayor eficiencia de detección de rayos. Esta zona abarca  $131.923 \text{ km}^2$  con una elevación máxima de 5.278 msnm, altitud correspondiente al volcán Nevado del Ruiz.



**Figura 2-4** Red de detección de rayos - LINET en Colombia. Tomado de [55]

En esta área específica, las distancias entre las bases de los sensores varían entre 120 km y 260 km. En la Figura 2-5 se presentan diferentes perfiles de elevación junto con la distancia a lo largo de las líneas de base, entre los cinco sensores situados en el área enmarcada en la Figura 2-4. Las líneas de base presentan variaciones en altitud desde menos de 100 m a más de 2500 msnm; tres sensores se encuentran en altitudes superiores a 2.000 msnm (Río Negro 2130, Bogotá 2555 y Tunja 2700), mientras los dos restantes se encuentran en altitudes intermedias y bajas (Ibagué 1200; Barrancabermeja 84) [55].



**Figura 2-5** Perfil de altitud a lo largo de las líneas de base en el área central de la red LINET. Tomado de [55]

En Colombia, todas las estaciones de la red mostradas en la Figura 2-4 transmiten las señales detectadas hasta la unidad de procesamiento central con la siguiente información: tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, discriminación entre descarga CG o IC, altura de emisión y forma de onda. La información es transmitida en tiempo real hasta un servidor espejo ubicado en las

instalaciones de Keraunos<sup>1</sup> en Bogotá. Mediante el software LINET-view, los datos son visualizados sobre un Sistema de Información Geográfica, en el que se pueden sobreponer los datos de rayos con mapas de cualquier instalación. Además el programa permite extraer la información y exportar los datos para poder realizar mapas de densidad.

### 2.2.1 Eficiencia de la Red

*Höller y Betz* en colaboración con otros autores, han evaluado el desempeño de la red LINET y la eficiencia de detección, en diferentes lugares del mundo donde se encuentra instalada. Se adelantaron campañas de medida en toda Europa, Brasil, Australia, África y EE.UU., donde su funcionamiento fue comparado con redes comúnmente usadas de LF y con sistemas avanzados y altamente costosos de VHF como SAFIR. Los resultados de validación se presentan en [56, 57]. Se ha establecido que la red LINET cuenta con una eficiencia de detección de rayos nube-tierra (CG) e intra-nube (IC) superior al 90%, con un error de ubicación menor a 250 m, lo que la cataloga como una red de alta precisión.

*Aranguren et al.* [55] evaluó la eficiencia relativa de detección de la red LINET, considerando la topografía del terreno (diferentes niveles de altitud). Se determinó que los valores máximos de densidad de descargas a tierra se presentan alrededor de los 1000 msnm, sin embargo no es posible afirmar que a esta altitud se vaya a presentar siempre la máxima densidad. De otra parte la eficiencia de detección relativa obtenida mediante el estudio de las distribuciones de corriente de pico en varios intervalos de altitud, mostró una tendencia a disminuir cuando aumenta la altitud. Las distribuciones de corriente pico son útiles para estimar la eficiencia de detección relativa en diferentes regiones o para diferentes condiciones; por ejemplo dos sistemas de localización de rayos (LLS-Lightning Location Systems) diferentes se pueden comparar en la misma zona y para el mismo período de tiempo, o los mismos LLS con diferente número de sensores en el tiempo. Los métodos relativos a la evaluación de la eficiencia de detección relativa para LLS se analizan en un informe de CIGRE [58]. Así entonces se puede concluir que la información recopilada por la red LINET que será utilizada en el

---

<sup>1</sup> Keraunos es la empresa en Colombia que opera la Red LINET

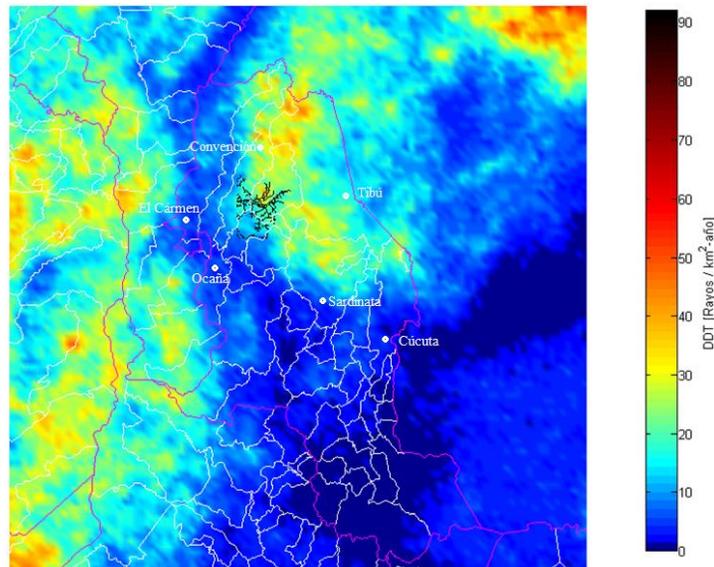
presente trabajo está plenamente respaldada por investigaciones reconocidas y que además la red presenta la mayor eficiencia en el país.

## **2.3 Densidad de descargas a tierra**

El concepto de densidad de descargas a tierra (DDT) permite caracterizar de forma adecuada, la actividad eléctrica atmosférica en una región determinada. La DDT se define como el número de rayos nube-tierra que caen en un área de un kilómetro cuadrado en un periodo de un año. Un rayo "flash" se compone de varias descargas de retorno subsecuentes "strokes" que ocurren por el mismo canal de aire ionizado producido por la descarga (stroke) inicial. Típicamente un "flash" CG registra entre 3 y 6 "strokes". Para el cálculo de la DDT se consideran los registros de "flashes" a partir de mediciones directas de contadores de rayos, sistemas de localización, sistemas satelitales o mediante ecuaciones empíricas que relacionan la densidad de descargas a tierra con el nivel cerámico. En el presente trabajo se utilizará la información registrada por la red de detección de rayos LINET. La red cuenta con registros desde el año 2011 y hasta la fecha, en la cual ha detectado más de 64'000.000 de rayos en todo el territorio colombiano.

### **2.3.1 Mapa de DDT en Norte de Santander**

La Figura 2-6 muestra la densidad de descargas a tierra para la zona donde se encuentran las líneas de transmisión y distribución del operador Centrales Eléctricas de Norte de Santander - CENS, obtenida a partir de los datos de detección de rayos de la red LINET para la línea de estudio. La DDT fue calculada usando una cuadrícula de  $1 \times 1 \text{ km}^2$ .

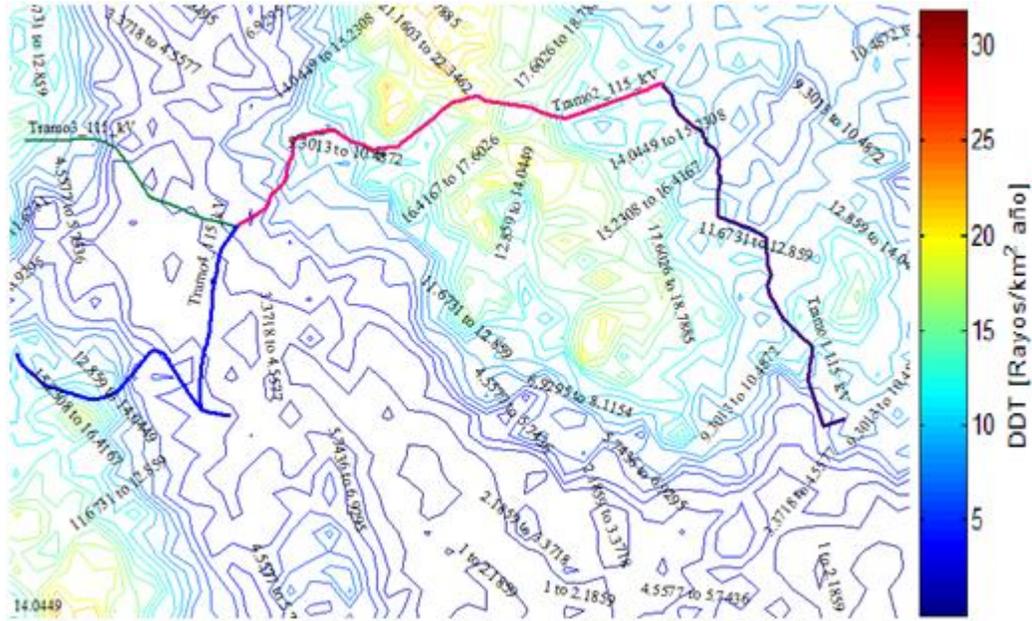


**Figura 2-6** DDT para Norte de Santander - Red LINET

La parte norte del departamento presenta valores de DDT mayores al resto, con valores que están entre  $25 \text{ rayos}/\text{km}^2$  y  $35 \text{ rayos}/\text{km}^2\text{-año}$ . De otra parte hacia el centro y sur oriente se observa una DDT representativa entre  $15$  y  $20 \text{ rayos}/\text{km}^2 \text{ año}$ . Finalmente hacia el occidente y el sur sobre los municipios de Sardinata, Ocaña, El Carmen y la capital Cúcuta, presentan valores entre  $5$  y  $12 \text{ rayos}/\text{km}^2 \text{ año}$ .

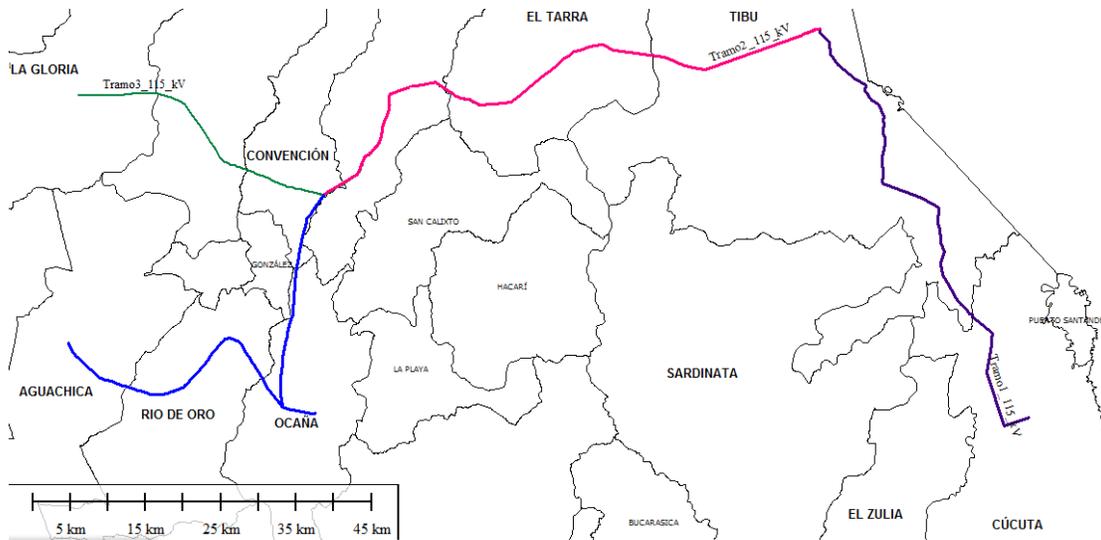
### 2.3.2 Línea de transmisión

En la Figura 2-7 se muestra el mapa de densidad de descargas a tierra, en la región donde se encuentra ubicada la línea de transmisión de 115 kV. Con el fin de facilitar el análisis, se ha dividido el circuito en cuatro tramos. Al igual que en el caso anterior, el mapa de densidad ha sido calculado utilizando una cuadrícula de  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ .



**Figura 2-7** DDT en región línea de transmisión

El tramo 1 se resalta en color violeta, el tramo 2 con el color fucsia, tramo 3 se identifica con el color verde y el tramo 4 con el color azul. Como se observa en la Figura 2-7, los mayores valores de densidad de obtienen en la mitad y hacia el norte del tramo 2, en la región del municipio de El Tarra donde se registran valores de densidad entre 20 y 25 rayos por  $km^2$ . Los tramos que se encuentran hacia el occidente sobre los municipios de El Carmen, Ocaña y Río de Oro (tramo 3 y 4) registran densidades entre 5 y 14 rayos por  $km^2$ . De otra parte hacia la región central sobre el municipio de Sardinata y hacia el sur oriente de la línea, que se encuentra sobre los municipios de Tibú y Cúcuta, en inmediaciones del tramo 1, la densidad de descargas a tierra varía entre 10 y 20 rayos por  $km^2$ . En la Figura 2-8 se ubican los tramos sobre los municipios de Norte de Santander.



**Figura 2-8** Ubicación geográfica Línea de transmisión

Al inicio del tramo 1, recorriéndolo de norte a sur desde el municipio de Tibú hacia El Zulia, presenta valores de DDT entre 8 y 11 rayos/ $km^2$  para los primeros 3 kilómetros del tramo. Luego del kilómetro 3 la densidad aumenta hasta 14 rayos/ $km^2$ , que es el valor más alto sobre este tramo. En la mitad del tramo 1 los valores de densidad varían entre 8 y 10 rayos/ $km^2$ . Hacia el final del circuito en El Zulia, la DDT registra la densidad más baja, 6 rayos/ $km^2$ .

Para el tramo 2, recorriendo la línea desde Tibú hacia Convención, se observa que al inicio del tramo, del kilómetro 1 al 10 la DDT aumenta de 10 a 14 rayos/ $km^2$ . El valor más alto de densidad para el tramo 2, se presenta sobre el kilómetro 32 aproximadamente, llegando a 20 rayos/ $km^2$ . Dos kilómetros hacia el norte sobre el kilómetro 32, se registra una densidad igual a 24 rayos/ $km^2$ . A partir del kilómetro 32 hacia convención, la DDT disminuye progresivamente hasta llegar a un mínimo de 4 rayos/ $km^2$ .

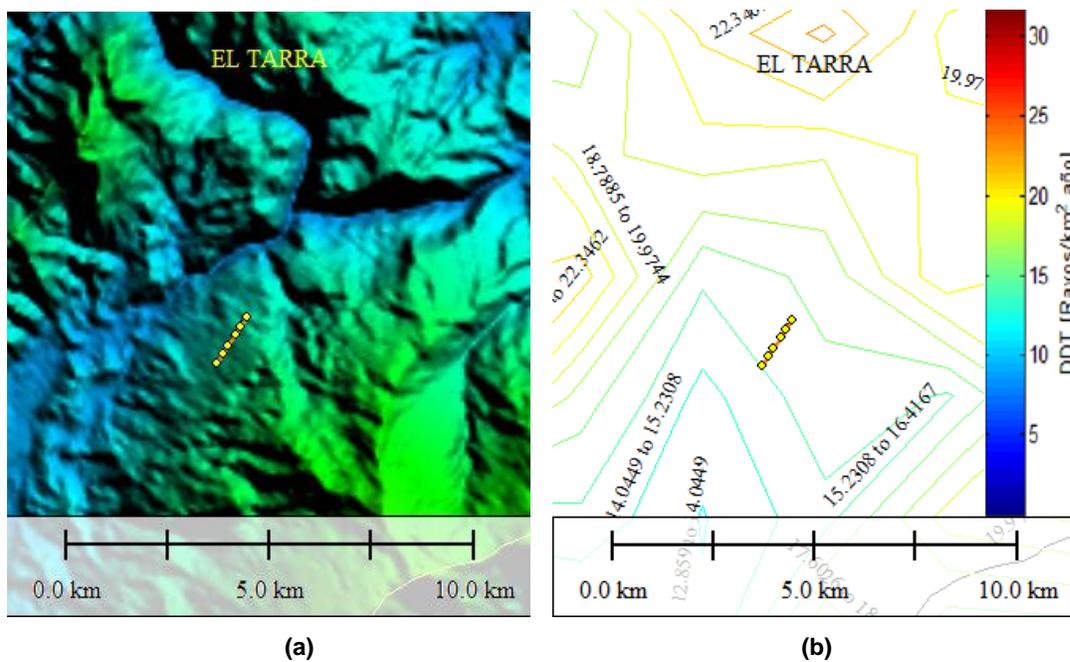
Para el tramo 3, al inicio sobre el municipio de Ayacucho (recorrido occidente- oriente), se observan los valores más altos de densidad, siendo el máximo valor registrado igual a 13 rayos/ $km^2$ . Posteriormente se aprecia que la DDT va disminuyendo a lo largo del tramo hacia el municipio de Convención, punto donde la densidad de descargas a tierra varía entre 4 y 5 rayos/ $km^2$ . Finalmente para el tramo 4 se observa que a lo largo del tramo la densidad varía entre 4 y 6 rayos/ $km^2$ . Aproximadamente en el kilómetro 55 sobre el municipio de Río de Oro, la DDT aumenta hasta alcanzar un máximo de 14

rayos/ $km^2$ . Un poco hacia el sur se registra una DDT cercana a 20 rayos/ $km^2$ . Hacia el final del tramo sobre Aguachica, la DDT es igual 12 rayos/ $km^2$ .

### 2.3.3 Circuitos de distribución

A continuación se presentan los tramos de circuitos seleccionados a partir del análisis de la topografía y la densidad de descargas a tierra en el sector donde se ubican los circuitos. Cabe aclarar desde ahora que los tramos tienen una longitud máxima de 2 km por efecto de limitaciones computacionales en simulación. Los tramos de circuito seleccionados recorren las regiones de El Tarra, Teorama y San Calixto, que presentan densidades de descargas a tierra con valores bajos, medios y altos, y adicionalmente una topografía montañosa que permitirá realizar la comparación entre terreno plano y no plano.

#### 2.3.3.1 El Tarra



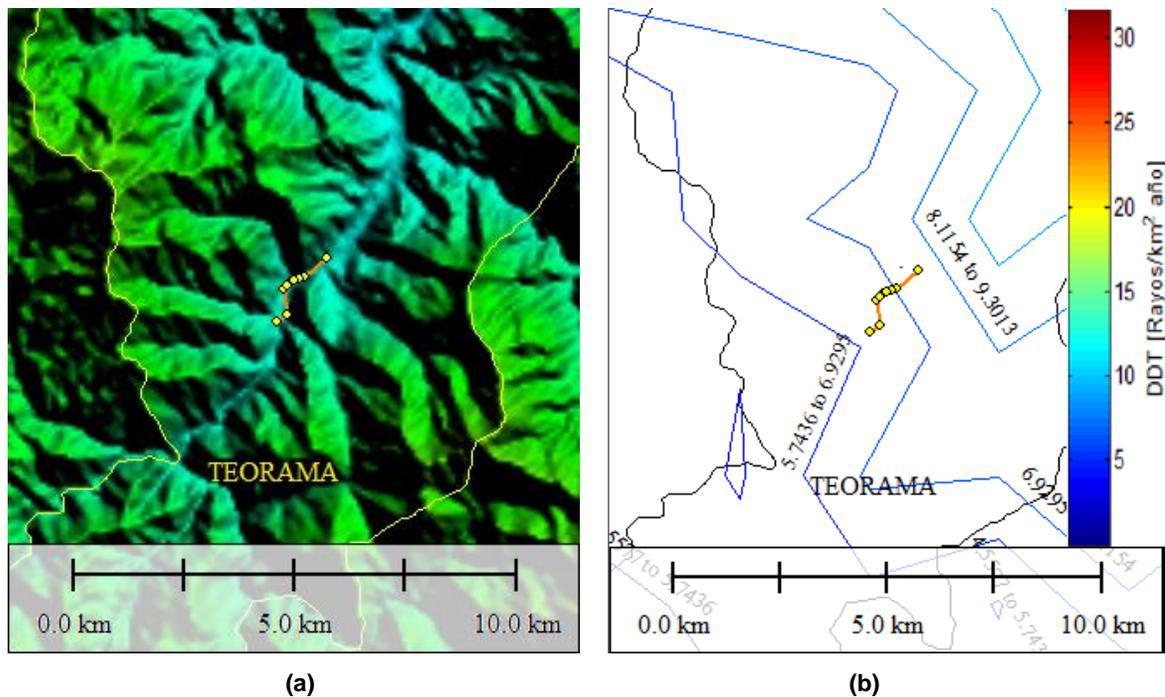
**Figura 2-9** Tramo El Tarra. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b).

En la Figura 2-9 (a) se muestra la topografía real del terreno sobre el cual está ubicado el tramo del circuito de El Tarra. Es posible observar que el tramo se encuentra sobre una montaña. En la Figura 2-9 (b) se presenta la densidad de descargas sobre el tramo. Se observa que la mayor densidad se presenta hacia el norte del tramo (sobre la parte alta de la montaña) en el municipio El Tarra, con un valor oscilante entre 22 y 24 rayos/ $km^2$ .

La menor densidad se presenta en la zona sur con un valor que desciende entre 12 y 14 rayos/ $km^2$ . Específicamente en la zona donde se encuentra el tramo a estudiar, la densidad presenta un valor medio entre 16,4 y 17,4 rayos/ $km^2$  año.

### 2.3.3.2 Consal - San Pablo

En la Figura 2-10 se presenta la topografía real del terreno para el tramo Consal - San Pablo (a) y el mapa de densidad de descargas a tierra para la zona del municipio de Teorama (b) donde se encuentra el tramo de circuito seleccionado.

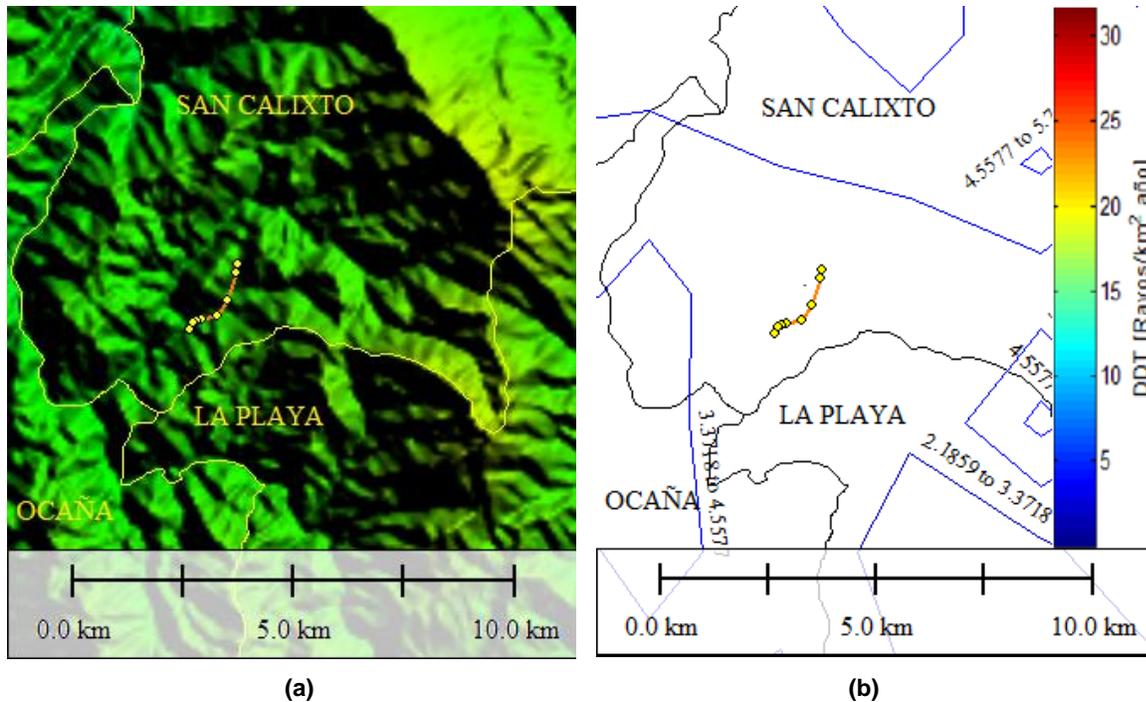


**Figura 2-10** Tramo Consal - San Pablo. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b).

El tramo se encuentra sobre terreno valle entre las montañas que están al oriente y al occidente del mismo. Hacia el sur del tramo del circuito Consal-San Pablo, se presenta una densidad que varía entre 5 y 7 rayos/ $km^2$  año. Hacia la mitad del tramo la densidad aumenta a 8 rayos/ $km^2$  año. Finalmente hacia el norte, en el final del tramo seleccionado la DDT varía entre 9 y 12 rayos/ $km^2$  año siendo este último el valor máximo que se registra en cercanía al tramo.

### 2.3.3.3 Consal - Teora

En la Figura 2-11 se presenta el tramo de circuito Consal - Teora sobre la topografía real del terreno (a) y el mapa de densidad de descargas a tierra sobre esta zona (b). Este circuito además del municipio de San Calixto recorre los municipios de Teorama y Hacarí.



**Figura 2-11** Tramo Consal - Teora. Topografía del terreno (a). Densidad de descargas a tierra (b).

Como se observa en la Figura 2-11 (a), la parte sur del tramo se encuentra sobre valle rodeado por montañas al norte y sur-oriente. La parte norte del tramo está ubicado sobre la montaña al norte que rodea la fracción sur del tramo. Respecto la Figura 2-11 (b) se tiene que hacia el sur del municipio de San Calixto donde se ubican el tramo de circuito, la densidad que varía entre 3 y 4 rayos/ $km^2$  año. Esta densidad se mantiene a lo largo del tramo. Hacia el norte se observa un leve incremento en la densidad alcanzando 6 rayos/ $km^2$  año. En el sur-oriente la DDT disminuye a un valor de 2 rayos/ $km^2$  - año.

De acuerdo con los registros de falla en dos años y medio del operador [59], para el circuito El Tarra los transformadores que presentaron en promedio 3 fallas tienen en la zona una DDT entre 10 y 12 rayos/ $km^2$ - año, es decir que se puede deducir que dichas

---

fallas coinciden con la incidencia de rayos ocurridas en esa zona. De igual forma ocurre con el circuito Consal - San Pablo y Consal - Teora. Para el primero se tiene que los transformadores que más fallan con un valor mayor de 5 fallas, presentan una DDT de 12 rayos/ $km^2$  - año en esa zona. Para el circuito Consal - Teora las zonas donde se encuentran los transformadores que más fallan con un valor mayor de 5 fallas, muestran una DDT de 4 rayos/ $km^2$  - año aproximadamente. Se puede concluir que las zonas donde se encuentran los transformadores que más fallan para cada uno de los tramos, están entre los valores máximos y medios de la DDT expuesta anteriormente en el capítulo 2.

### 3. Tensiones inducidas sobre líneas aéreas para terreno plano y no-plano

En este capítulo se analizará la respuesta de las tensiones inducidas por rayo, al ubicar los tramos de redes de distribución seleccionados en el capítulo anterior sobre la topografía real del terreno (configuración terreno no-plano), en comparación con las respuestas de tensiones inducidas si se considera la configuración para la misma línea sobre terreno plano.

En la práctica no se encuentran terrenos que puedan asumirse con conductividad infinita, razón por la cual para las simulaciones se considerará la conductividad finita del terreno. Esto permitirá representar escenarios que se aproximan más a la realidad. Particularmente en el departamento de Norte de Santander, predominan los suelos eriales que hacen referencia a las capas expuestas de la tierra que no poseen ningún tipo de vegetación. En esta categoría se encuentran las tierras asociadas a procesos erosivos de origen natural por la acción del agua y el viento. Lo anterior debido principalmente al tipo de suelos *arcillosos* con tendencia a la *absorción de agua* y a la fragilidad de la vegetación del lugar. Este tipo de suelo tiene una fuerte presencia en los municipios de Abrego, La Playa, Ocaña, El Carmen, Cáchira, San Calixto y Hacarí. [60][61]. De acuerdo con la clasificación de resistividad de suelo por conformación hecha por Casas [62], para un terreno arcilloso-húmedo predominante en los municipios que recorren los tramos de circuito seleccionados y presentados en el capítulo 2, el valor típico de resistividad es de  $100 \Omega \cdot m$ . Esto corresponde a una conductividad de terreno de  $0.01 S \cdot m$  que será utilizado en las simulaciones.

### 3.1 Casos de Simulación

En esta sección se obtienen las tensiones inducidas para diferentes líneas de distribución ubicadas sobre diferentes configuraciones de terreno plano y no-plano. La longitud de las líneas distribución y la altura varía de acuerdo a la configuración sin embargo la línea siempre está 10 m por encima del terreno. El radio del conductor es de 5 mm, con una resistencia de  $0.253 \Omega$ . En los extremos de los tramos de circuito hay conectada una impedancia cercana a la impedancia característica de la línea para evitar el efecto de ondas reflejadas ( $497.3 \Omega$ ). La conductividad del terreno es finita con un valor de  $0.01 \text{ S/m}$ . Se simulará una descarga de retorno subsecuente con  $I_0 = 12 \text{ kA}$  y  $di/dt = 12 \text{ kA}/\mu\text{s}$ , que se representa con una función de Heidler con los siguientes parámetros:  $I_{01} = 10.7 \text{ kA}$ ,  $\tau_{11} = 0.25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{12} = 2.5 \mu\text{s}$ ,  $I_{02} = 6.5 \text{ kA}$ ,  $\tau_{21} = 2.1 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{22} = 230 \mu\text{s}$ ,  $n = 2$  [46]. Se utilizará un modelo TL para representar la variación de la corriente a lo largo del canal, una altura del canal de 8 km y una velocidad de la descarga de retorno de  $120 \text{ m}/\mu\text{s}$ . Se escoge un paso de  $\Delta_r = \Delta_z = 5 \text{ m}$  para el método de diferencias finitas, en el cálculo del campo electromagnético producido por el rayo. Los valores de corriente usados son los mismos utilizados en la literatura internacional, especialmente las usadas por Nucci en sus simulaciones[46] [47]. Se escogió esta forma de onda entre otras para lograr que la tensión inducida tenga un tiempo de cola corto para que la ventana de tiempo de simulación esté limitada entre 5 y  $6 \mu\text{s}$ , de acuerdo a la capacidad computacional disponible. El computador tiene procesador Intel (R) Core (TM) i5-3210M CPU @ 2.50 GHz, memoria RAM de 8 GB y sistema operativo Windows 8 x64 bits. El tiempo de simulación de terreno plano es prácticamente instantáneo mientras para terreno no-plano está entre 50 y 75 minutos.

Para la simulación de terreno plano la tensión inducida en la línea se obtiene a través del programa de simulación de tensiones inducidas Yaluk Draw [5], que implementa el método de acople de Agrawal para calcular la tensión inducida en la línea de distribución. Para la simulación de terreno no-plano la tensión inducida se obtiene mediante el código de simulación desarrollado por Soto [6]. En este último caso, como se justificó en el párrafo anterior, el tiempo de simulación está restringido entre 5 y  $6 \mu\text{s}$  por limitaciones de memoria computacional. Esta condición podría ocasionar que en algunos casos no se alcance a obtener respuesta en todos los nodos debido a que el tiempo de viaje de las

ondas electromagnéticas hacia los nodos más alejados podría ser mayor al tiempo de simulación y por consiguiente este último no sería suficiente para observar el efecto en los puntos más distantes.

Por otra parte para efectos de comparación, lógicamente los puntos de impacto para terreno plano y no-plano serán los mismos para cada caso. Adicionalmente se simularán varios puntos de impacto para un mismo tramo, con el fin de observar además del cambio entre el tipo de terreno, las variaciones que se obtienen en las tensiones inducidas cuando las descargas de rayo se dan en partes altas de montaña (evento más probable) o en las partes bajas/valle.

### 3.1.1 Tramo El Tarra:

A continuación se presenta las simulaciones para el tramo seleccionado del circuito sobre el municipio de El tarra. El tramo que consta de 6 nodos, se encuentra sobre la montaña que separa los municipios de Tibú y El Tarra. En todos los casos, en los nodos de los extremos del tramo (nodos 1 y 6), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea. Estas impedancias se conectan para evitar el efecto de ondas reflexivas afecten el valor real de la sobretensión.

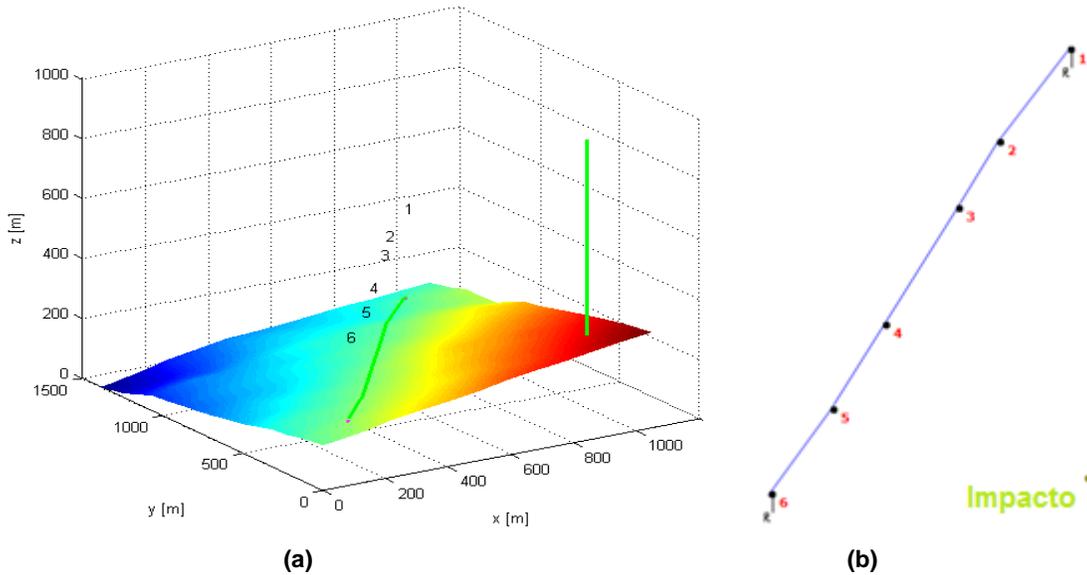
A continuación se presenta la altura de los nodos del tramo de circuito, tomando como referencia 0 m para el punto más bajo del terreno (Tabla 3-1). La diferencia de altura de entre los nodos varía entre 5 m y 20 m. Se aclara desde este punto que las alturas presentadas para cada tramo no corresponden a la altitudes reales (msnm) sino respecto a una referencia de 0 m para el punto más bajo del terreno para cada caso.

**Tabla 3-1:** Altura de nodos tramo El Tarra

Nodo	Altura [m]
1	155
2	160
3	165
4	166
5	170
6	175

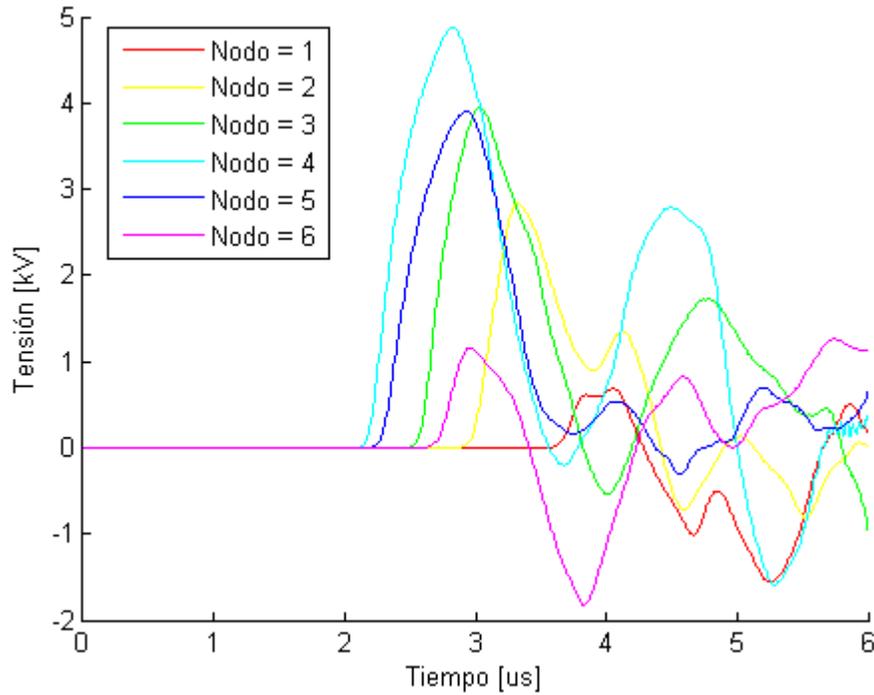
### 3.1.1.1 Impacto 1

En la Figura 3-1 se muestra el trazado del tramo sobre la topografía real del municipio de El Tarra para terreno no-plano (a) y para terreno plano (b). El rayo impacta a 782 m al oriente y 46 m al norte del nodo 6. Para terreno no-plano, el impacto ocurre en el pico de la montaña al oriente del circuito, a una altura de 285 m. La diferencia de altura entre el impacto y el nodo más alto (menor diferencia de altura) es 110 m. El canal de la descarga de rayo se indica con la línea vertical de color verde para terreno no-plano (a). Para terreno plano (b) la descarga se representa por el punto en color verde.



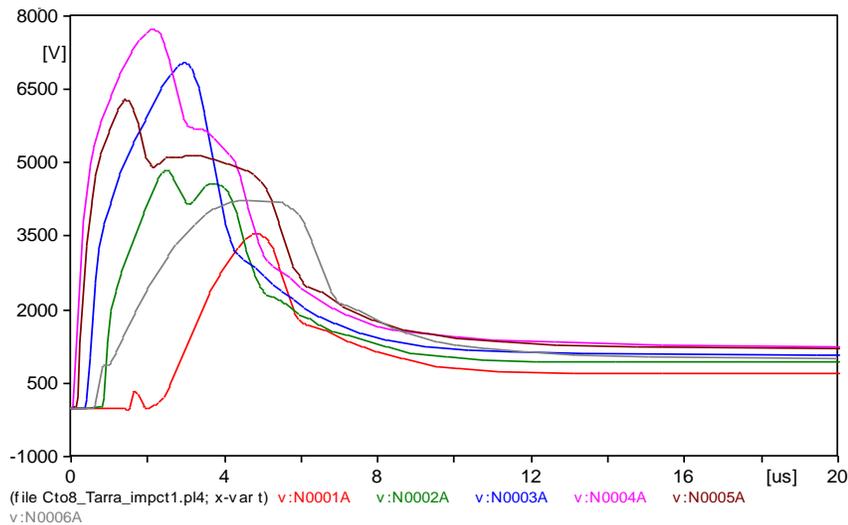
**Figura 3-1** Configuración terreno no-plano (a) y terreno plano (b). Tramo El Tarra. Impacto 1

En la Figura 3-2 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre el municipio de El Tarra, transcurridos 6  $\mu$ s para terreno no-plano.



**Figura 3-2** Tensiones inducidas terreno no-plano tramo El Tarra. Impacto 1

En la Figura 3-3 se muestra la respuesta de tensiones inducidas en cada uno de los nodos en el tramo del circuito sobre el municipio de El Tarra despreciando la topografía real del terreno, es decir, asumiendo terreno plano.



**Figura 3-3** Respuesta terreno plano tramo El Tarra. Impacto 1

Los valores máximos de tensiones inducidas para el primer impacto del tramo El Tarra para terreno plano y no-plano se resumen en la Tabla 3-2. Se presenta además la relación entre los valores obtenidos para tensiones inducidas (Plano/No-plano).

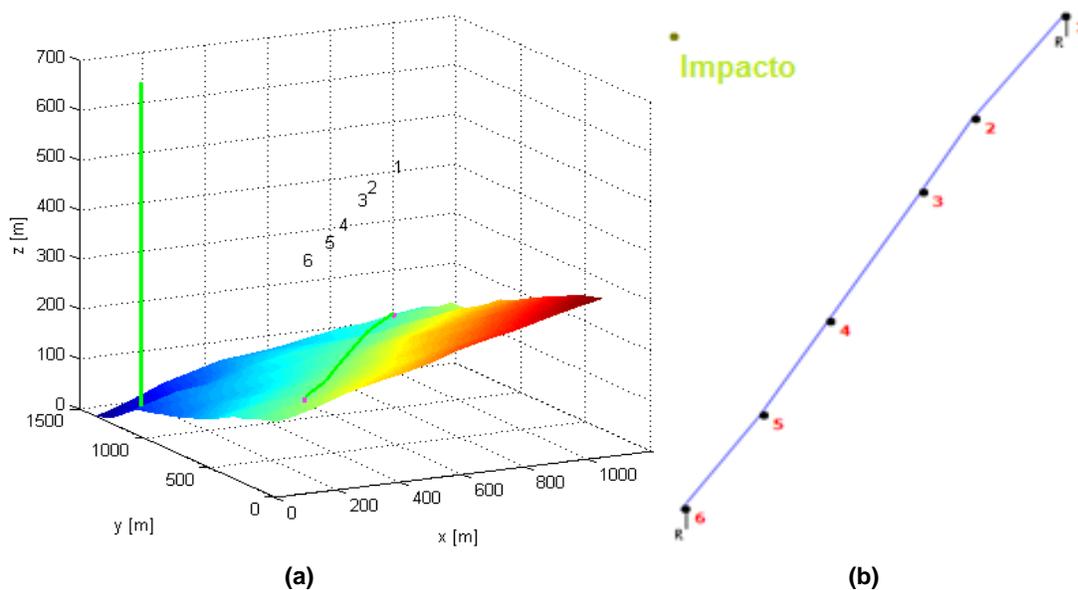
**Tabla 3-2:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 1

Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	-1.56	5.25	3.56	4.83	2.28
2	2.83	3.32	4.85	2.47	1.71
3	3.94	3.03	7.04	2.96	1.79
4	4.88	2.83	7.74	2.14	1.59
5	3.90	2.93	6.29	1.42	1.62
6	-1.82	3.83	4.24	4.58	2.33

De los resultados presentados es posible inferir que para este impacto que ocurre lejos de la línea, las tensiones inducidas para terreno plano son mayores que las tensiones obtenidas para terreno no-plano. En promedio las tensiones en terreno plano son 1.88 veces mayores que en no-plano. El impacto que ocurre en lo alto de la montaña a 285 m para terreno no-plano, es casi simétrico. En ambos casos, las sobretensiones más altas se presentan en los nodos 3 y 4, siendo estos los que se encuentran más cerca al punto de impacto (distancia lineal). Consecuentemente, las menores sobretensiones se presentan en los nodos 1 y 6, que además registran un cambio de polaridad en su máxima tensión inducida. En ambos casos la sobretensión obtenida en el nodo 1 es la menor de todas. Ahora bien, al analizar el caso no-plano que además de la distancia de los nodos al impacto considera la altura y topografía del terreno, se tiene que el nodo 3 que está a 748 m del impacto y 165 m sobre el terreno, presenta una tensión inducida mayor que el nodo 5 que está a 660 m y 170 m sobre el terreno. Lo anterior indicaría que puede presentarse una mayor tensión inducida en nodos más alejados pero a una altura menor. También podría influir que diferencia de altura respecto al impacto sea mayor, algo que se analizará en los siguientes impactos.

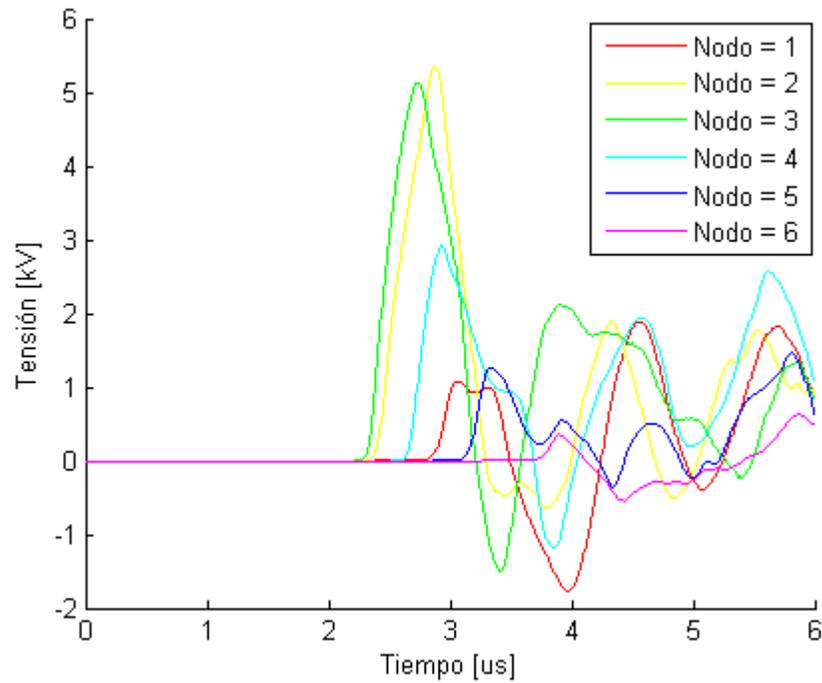
### 3.1.1.2 Impacto 2

En la Figura 3-4 se muestra la segunda descarga de rayo en cercanías del tramo de circuito de El Tarra, sobre la topografía real del municipio (a) y sobre terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 73 m al occidente y 1081 m al norte del nodo 6. Ocurre hacia sobre la ladera de la montaña, al occidente del tramo a una altura de 35 m. . La diferencia de altura entre el impacto y el nodo más bajo (menor diferencia de altura) es 120 m.



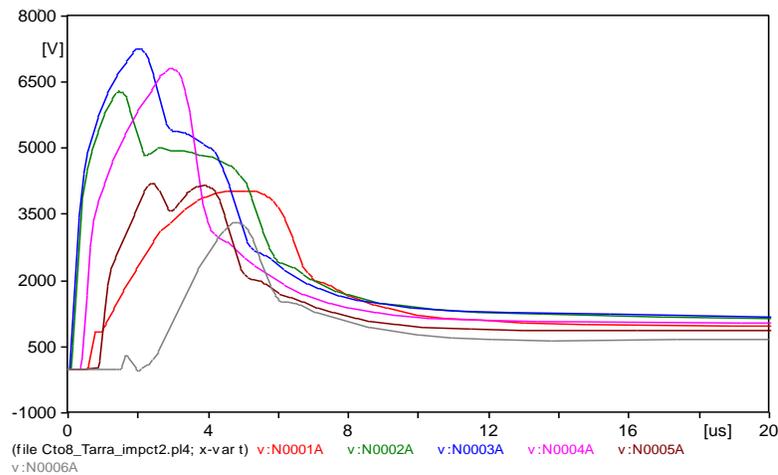
**Figura 3-4** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b)Tramo El Tarra. Impacto 2

En la Figura 3-5 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre el municipio de El Tarra para un tiempo de simulación igual a 6  $\mu$ s.



**Figura 3-5** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra. Impacto 2

En la Figura 3-6 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo del tramo asumiendo terreno plano.



**Figura 3-6** Tensiones inducidas para terreno plano tramo El Tarra. Impacto 2

En la Tabla 3-3 se presentan los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el segundo impacto en terreno plano y no-plano. Se presenta también la relación entre las tensiones obtenidas.

**Tabla 3-3:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 2

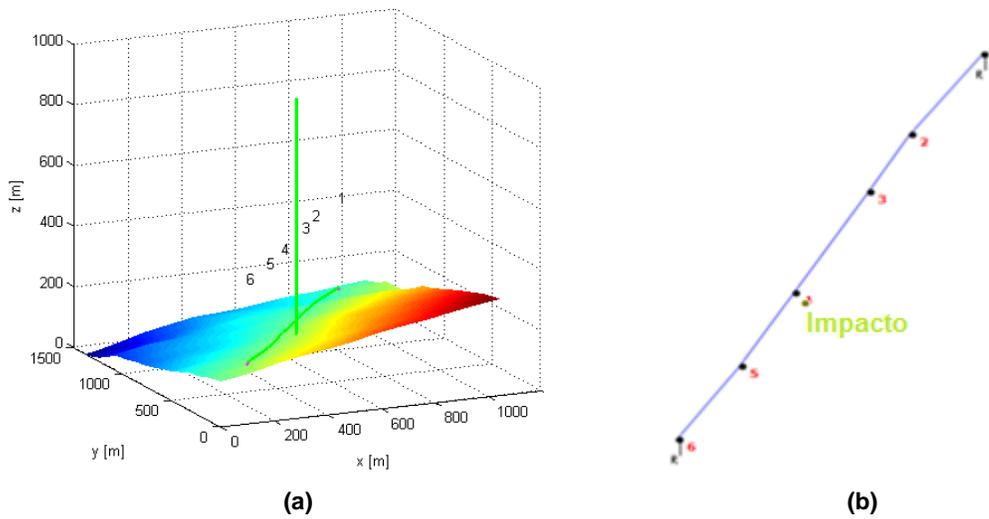
Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	1.89	4.56	4.03	5.06	2.14
2	5.34	2.88	6.29	1.48	1.18
3	5.13	2.74	7.25	2.04	1.41
4	2.92	2.93	6.81	2.96	2.33
5	1.47	5.81	4.20	2.40	2.87
6	0.61	5.90	3.31	4.82	5.38

En la Tabla 3-3 se observa que al igual como ocurrió para el primer impacto, en este que también ocurre distante del tramo pero a una menor altura, se obtienen tensiones mayores en terreno plano que en terreno no-plano. Como se mencionó la menor diferencia de altura entre el impacto y el tramo es superior a 100 m. Esta vez el impacto es menos simétrico, más cercano al nodo 3 que al nodo 4. Para el caso de terreno no-plano el rayo impacta a 35 m sobre el terreno y las tensiones más altas se presentan en los nodos 2 y 3, siendo estos los más cercanos a la descarga a 684 m y 666 m respectivamente, sin embargo el nodo 2 presentó una tensión inducida más alta. Al detallar la topografía se observa que el nodo 2 está a una menor altura que el nodo 3 (160 m y 165 m respectivamente). Al igual que en el caso anterior, se presenta una mayor tensión en un nodo más distante pero a una altura menor. Las sobretensiones más bajas se presentan en los nodos 1 y 6, siendo la sobretensión obtenida en el nodo 6 la menor de todas en ambos casos (nodo más lejano de la descarga).

### 3.1.1.3 Impacto 3

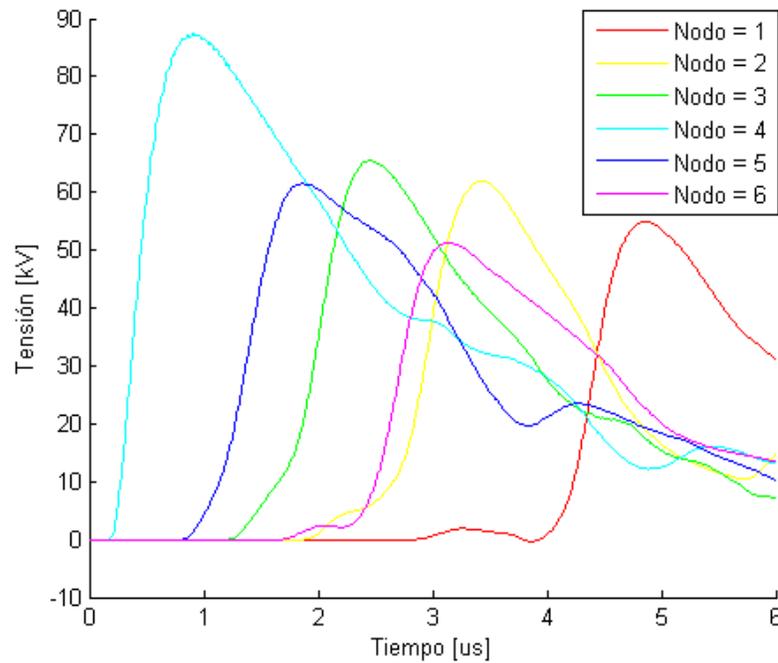
En la Figura 3-7 se observa la configuración del tramo sobre la topografía real del municipio (a), y la configuración asumiendo terreno plano (b) para el tercer impacto. El rayo impacta sobre el terreno a 36 m al oriente y 42 m al sur del nodo 4. Respecto al nodo 6 la descarga ocurre a 322 m al oriente y 381 m al norte. Es un impacto cercano a la línea. Para terreno no-plano la descarga (línea vertical en color verde) impacta en la parte media de la montaña, al oriente del circuito a una altura de 166 m. La diferencia de altura entre el impacto y el nodo más bajo (mayor diferencia) es 11.6 m, es decir que los

demás nodos presentan una diferencia de altura menor con respecto a la altura del terreno donde ocurre el impacto.



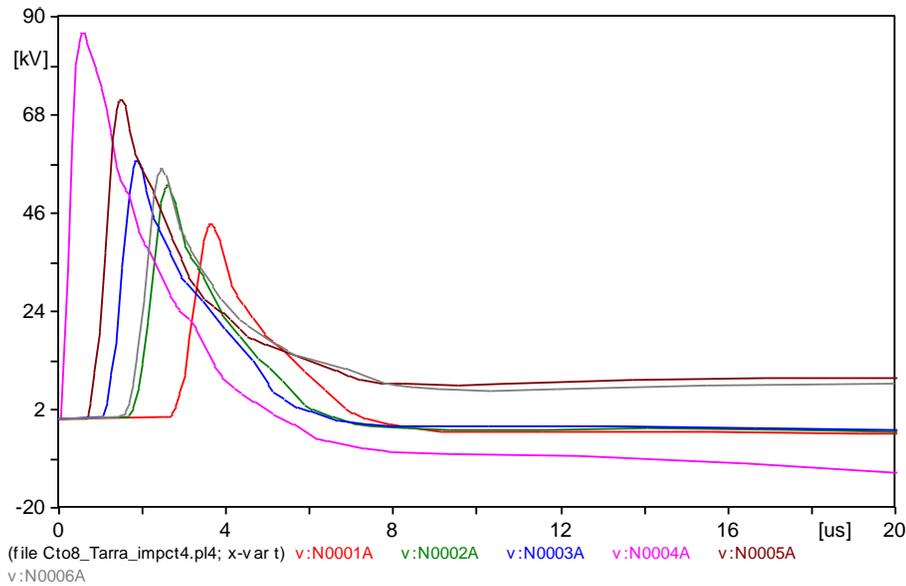
**Figura 3-7** Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra. Impacto 3

En la Figura 3-8 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre el municipio de El Tarra para un tiempo de simulación igual a 6  $\mu$ s.



**Figura 3-8** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra. Impacto 3

En la Figura 3-9 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo.



**Figura 3-9** Tensiones inducidas para terreno plano. Tramo El Tarra. Impacto 3

En la Tabla 3-4 se presenta las valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el tercer impacto. Así mismo, se presenta la relación entre las tensiones obtenidas para terreno plano y terreno no-plano.

**Tabla 3-4:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 3

Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	54.94	4.86	43.48	3.58	0.79
2	61.95	3.43	52.19	2.59	0.84
3	65.42	2.46	57.67	1.86	0.88
4	87.37	0.90	86.26	0.54	0.99
5	61.49	1.86	71.52	1.49	1.16
6	51.27	3.14	55.95	2.46	1.09

De los resultados presentados se observa que contrariamente a los resultados obtenidos en los impactos anteriores que ocurrían distantes del tramo, se obtuvo tensiones mayores en terreno no-plano en los nodos 1, 2, 3 y 4. Solo los nodos 5 y 6 presentaron tensiones mayores en terreno plano. La mayor diferencia se presenta en el nodo 1 donde

la tensión inducida en terreno plano es 21% menor que la tensión de terreno no-plano. Al analizar la altura se observa la diferencia de altura entre los nodos y el impacto es menor a 11.6 m, sin embargo los nodos 1, 2 y 3 que están a menos de 166 m que es la altura del terreno en el punto de impacto, registran mayores tensiones con respecto al caso plano, mientras que los nodos que están a una altura superior al impacto (nodos 5 y 6), presentan tensiones inducidas menores que en terreno plano.

Para terreno plano como es de esperarse, el nodo 4 que el más cercano al impacto (55.5 m), presenta la mayor sobretensión 86.26 kV. Continúan en orden de cercanía al impacto, los nodos 5, 3 y 6. El nodo 1 que es el más alejado del punto de impacto (845 m), presenta la menor tensión inducida 43.48 kV. Al hacer el mismo análisis para terreno no-plano, se observa de nuevo la influencia del terreno. En este caso el nodo 3 que está a 364 m del impacto y a una de altura 165 m, presenta una mayor tensión inducida que el nodo 5 que está a 238 m del impacto y a una altura de 170 m. Se observa entonces que aún cuando el nodo 5 está más cerca al impacto pero a una altura mayor, presenta una tensión menor que el nodo 3 que está más alejado pero a una altura menor que la del impacto. Por otra parte podría influir que la diferencia de altura entre los nodos 3 y 5, y el impacto es 1.6 m y 3.4 m respectivamente, es decir menor diferencia en el nodo 3.

### **3.1.2 Tramo Consal - San Pablo:**

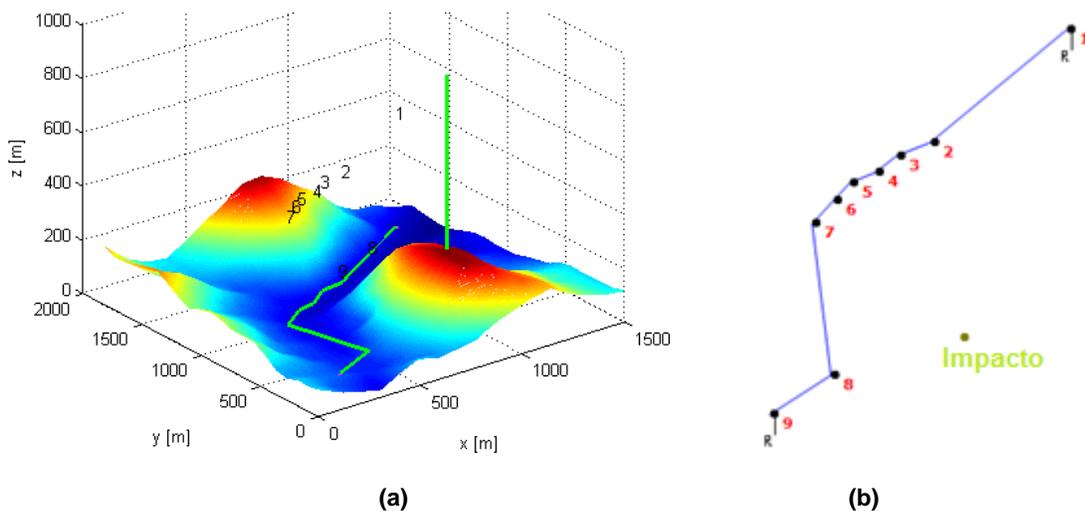
A continuación se presentan las simulaciones para el tramo seleccionado del circuito Consal - San Pablo que recorre el municipio de Teorama en Norte de Santander. El tramo consta de 9 nodos, se encuentra sobre terreno valle entre dos montañas. Para todos los casos de impacto, en los extremos del tramo (nodos 1 y 9), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea (497.3  $\Omega$ ). La diferencia de altura de terreno entre los postes de los nodos varía entre 5 m y 40 m. A continuación se presenta la altura por nodo (Tabla 3-5).

**Tabla 3-5:** Altura nodos tramo Consal-San Pablo (Teorama)

Nodo	Altura [m]
1	30
2	35
3	45
4	30
5	35
6	40
7	50
8	65
9	70

### 3.1.2.1 Impacto 1

En la Figura 3-10 se muestra el tramo del circuito Consal - San Pablo sobre la topografía del municipio de Teorama (a) y sobre terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 463 m al oriente y 141 m al norte del nodo 8 distante de la línea. En terreno no-plano (a) la descarga de rayo que se indica con la línea vertical de color verde, ocurre en el pico de la montaña que está al oriente del tramo a una altura de 295 m. La diferencia de altura entre el impacto y el nodo más alto (menor diferencia) es 225 m. En el punto de impacto la densidad de descargas a tierra está entre 7 y 8  $rayos/km^2 - año$ . En terreno plano (b) la descarga se indica con el punto de color verde.

**Figura 3-10** Configuración terreno no-plano Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1

En la Figura 3-11 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre terreno no-plano, transcurridos 6  $\mu$ s.

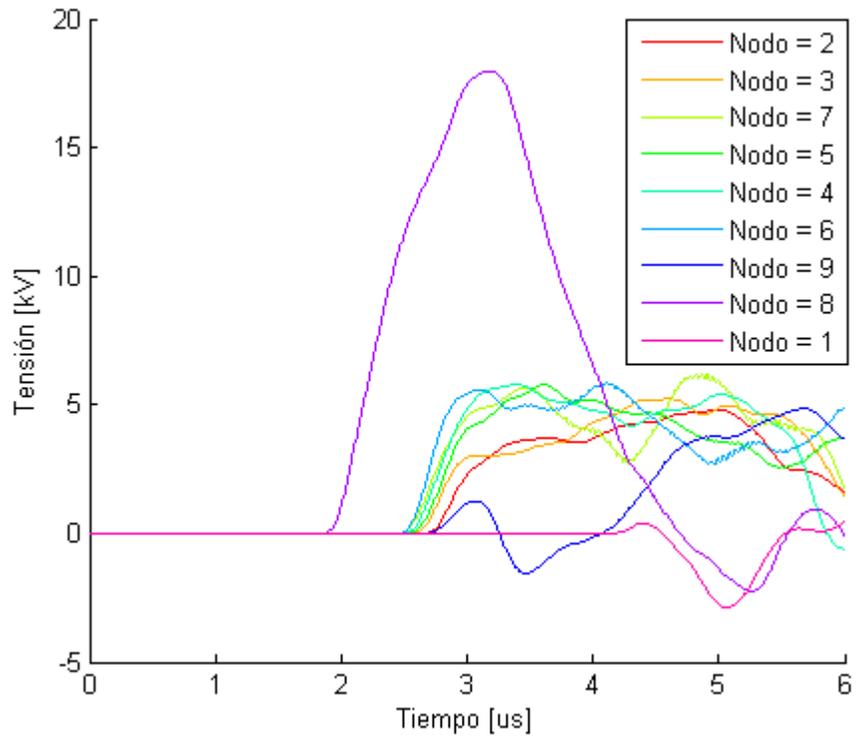


Figura 3-11 Respuesta terreno no-plano tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1

En la Figura 3-12 se muestra la respuesta de tensiones inducidas asumiendo terreno plano.

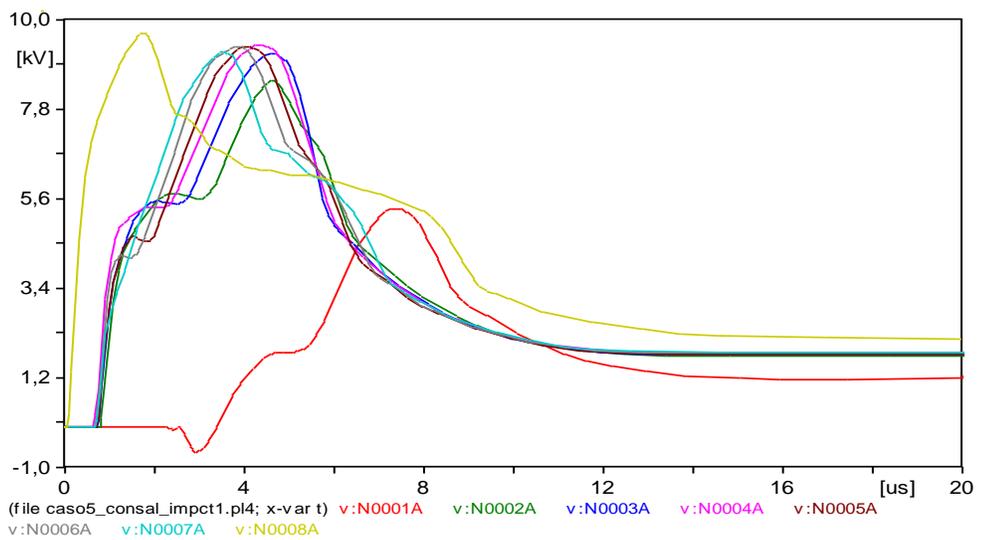


Figura 3-12 Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1

La Tabla 3-6 resume los valores máximos de tensiones inducidas para el primer impacto en los nodos del tramo Consal - San Pablo en el municipio de Teorama, para terreno plano y no-plano.

**Tabla 3-6:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 1

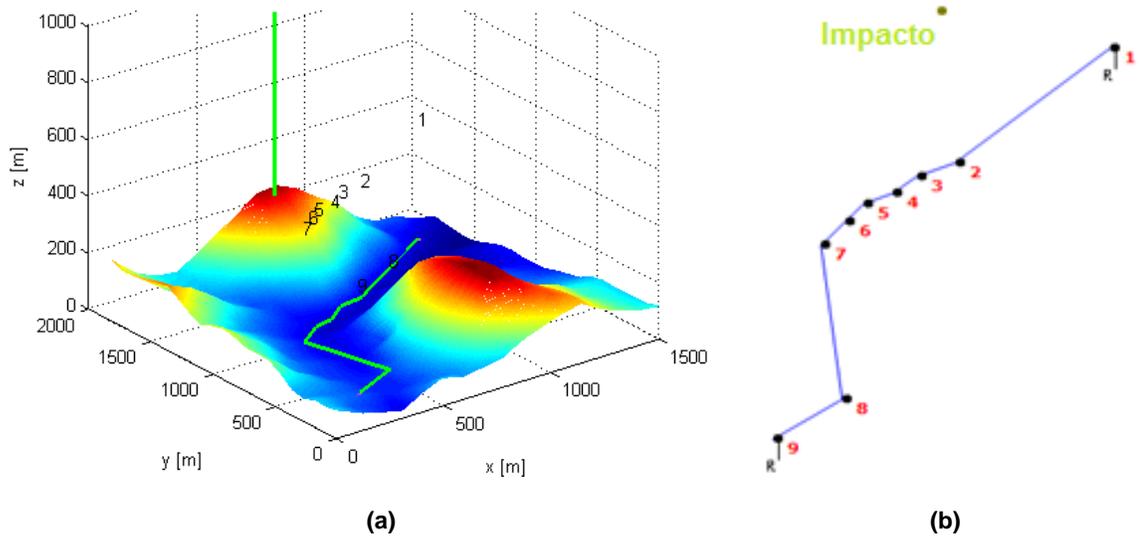
Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	-2.87	5.09	5.37	7.38	1.87
2	4.80	5.00	8.50	4.62	1.77
3	5.23	4.62	9.17	4.64	1.75
4	5.78	3.40	9.40	4.37	1.63
5	5.78	3.61	9.35	4.00	1.62
6	5.89	4.11	9.35	3.84	1.59
7	6.19	4.86	9.23	3.54	1.49
8	17.98	3.18	9.70	1.74	0.54
9	4.85	5.66	5.05	6.54	1.04

En la Tabla 3-6 se observa que a excepción del nodo 8, las sobretensiones obtenidas para terreno plano son mayores a las obtenidas en terreno no-plano (impacto alejado sobre el pico de la montaña). En promedio, la relación entre plano y no-plano es 1.6 (excluyendo nodo 8). Este valor es muy similar al obtenido en el primer impacto del tramo de El Tarra (1.88), donde la descarga también se daba en lo alto de la montaña. Ahora bien, analizando el resultado obtenido en el nodo 8, se tiene que es el segundo nodo a mayor altura (65 m) y el más cercano al punto de impacto. Al medir la distancia lineal, para terreno no-plano el nodo 8 está a 536 m del impacto, mientras los demás nodos están a más de 700 m. El nodo más distante del impacto es el 1 (1247 m) que presenta la menor tensión y además cambio de polaridad (-2.87 kV) para el caso de terreno no-plano. Para ambos casos, después del nodo 8, las sobretensiones más altas se presentan en los nodos 6 y 7.

### 3.1.2.2 Impacto 2

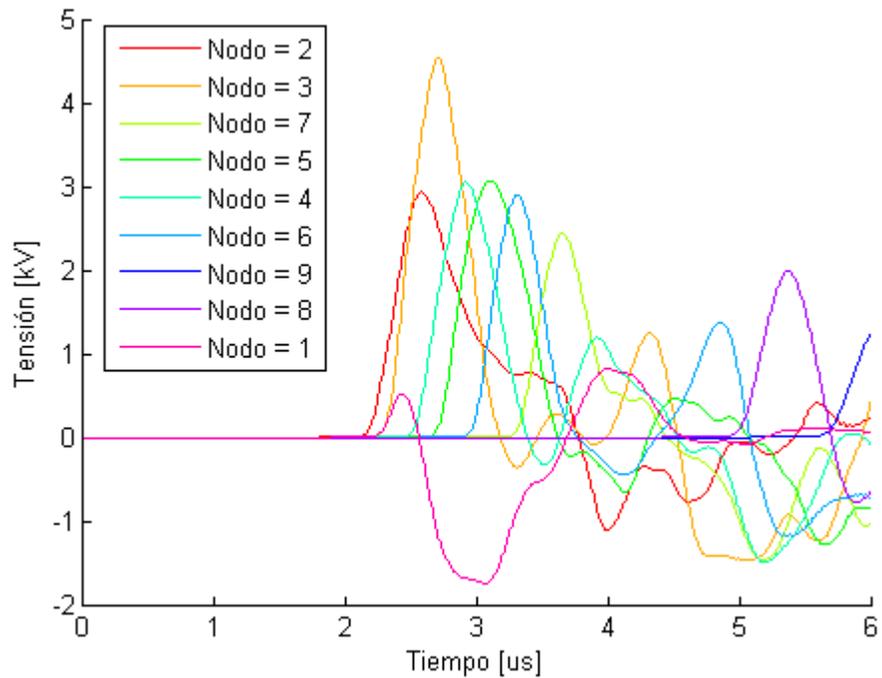
En la Figura 3-13 se muestra la segunda descarga de rayo en cercanías del tramo de circuito de Consal - San Pablo, sobre la topografía real del municipio de Teorama (a) y

sobre terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 51 m al oriente y 615 m al norte del nodo 3 (impacto alejado). En terreno no-plano la descarga ocurre en el pico de la montaña que está al noroccidente del tramo a una altura de 275 m. La diferencia de altura entre el impacto y el nodo más alto (menor diferencia) es 205 m.



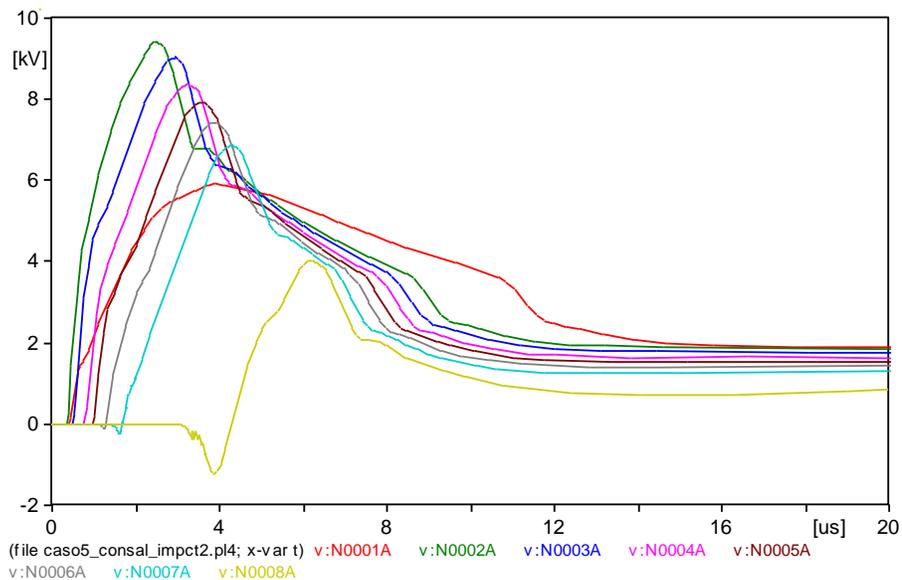
**Figura 3-13** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2

En la Figura 3-14 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre el municipio de El Tarra para un tiempo de simulación igual a 6  $\mu$ s.



**Figura 3-14** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2

En la Figura 3-15 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo del tramo Consal - San Pablo asumiendo terreno plano.



**Figura 3-15** Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 2

En la Tabla 3-7 se presentan los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el segundo impacto en terreno plano y no-plano. Adicionalmente se presenta la relación entre los valores obtenidos (Plano / No-plano).

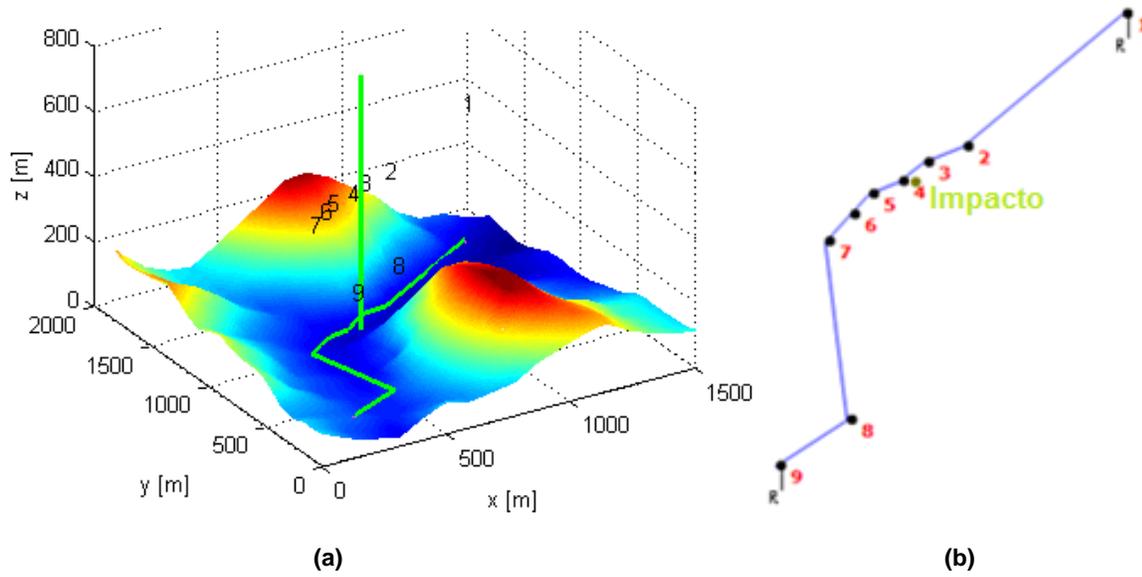
**Tabla 3-7:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 2

Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-Plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	-1.74	3.07	5.91	3.90	3.39
2	2.93	2.57	9.42	2.49	3.21
3	4.54	2.70	9.03	2.93	1.99
4	3.05	2.92	8.35	3.28	2.74
5	3.07	3.10	7.93	3.58	2.58
6	2.90	3.31	7.43	3.87	2.56
7	2.45	3.66	6.86	4.27	2.80
8	1.99	5.37	4.03	6.21	2.03
9	-	-	3.47	7.16	-

En los resultados presentados en la Tabla 3-6 se observan menores tensiones en el caso no-plano en comparación con los valores de terreno plano. La tendencia es la misma observada para el primer caso cuando las descargas ocurren distantes del tramo y a una altura superior, para este caso el impacto ocurre al menos 205 m más alto respecto al circuito. Para este caso en terreno plano y no-plano se presentan tensiones inducidas mayores en los nodos 2, 3, 4 y 5 con valores de 2.9, 4.5, 3 y 3 kV respectivamente para terreno no-plano, y 9.42, 9, 8.35 y 7.9 kV para terreno plano. Se tiene que para terreno plano el nodo 2 presenta la sobretensión más alta (nodo más cercano al rayo), sin embargo no coincide con el resultado con terreno no-plano. Al considerar la topografía del terreno, es decir, caso de terreno no-plano, el nodo 3 que está 40 m más alejado que el nodo 2 respecto al impacto, presenta la tensión inducida más alta. Al comparar la altura entre estos, se observa que el nodo 3 está a una altura mayor. Los menores valores se presentan en los nodos más alejados al punto de impacto.

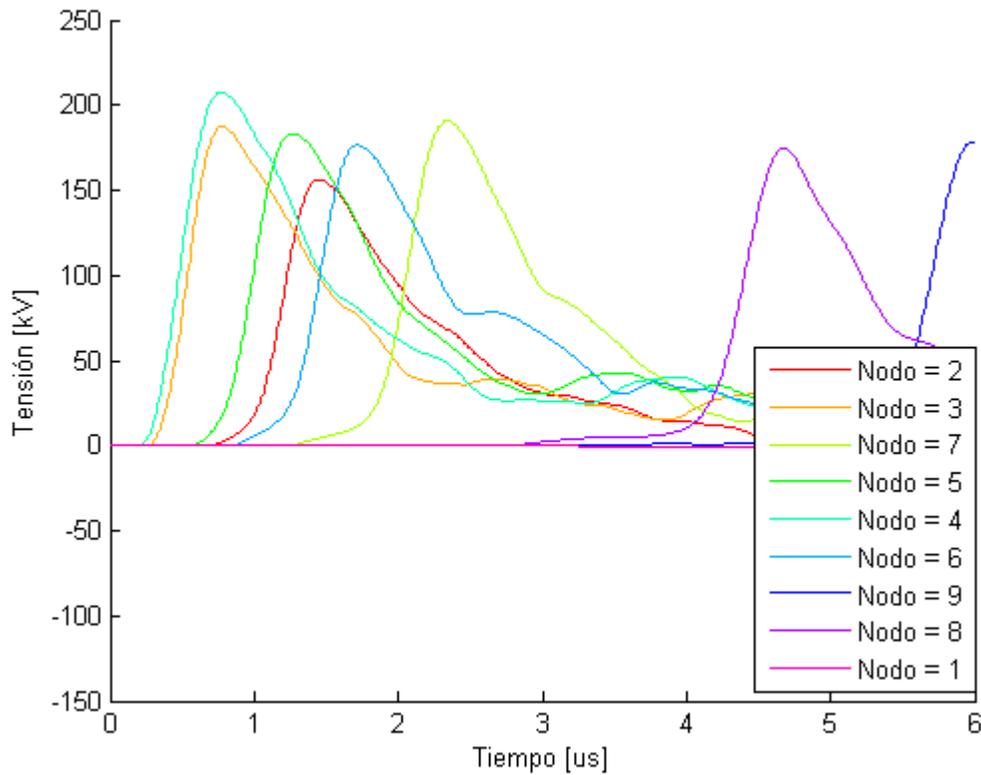
### **3.1.2.3 Impacto 3**

En la Figura 3-16 se presenta el tercer impacto sobre el tramo Consal - San pablo para terreno no-plano (a) y plano (b). El rayo impacta a 50 m al oriente y 7 m al norte del nodo 4. Respecto al nodo 3 la descarga ocurre a 29 m al occidente y 55 m al sur Es un impacto cercano a la línea. Para terreno no-plano el impacto ocurre en el valle entre las montañas, al oriente del tramo a una altura de 17.3 m. La mayor diferencia de altura entre el impacto y los nodos del tramo es 52.65 m (nodo 9). La diferencia de altura entre los nodos 1 a 8 y el terreno donde impacto el rayo es menor.



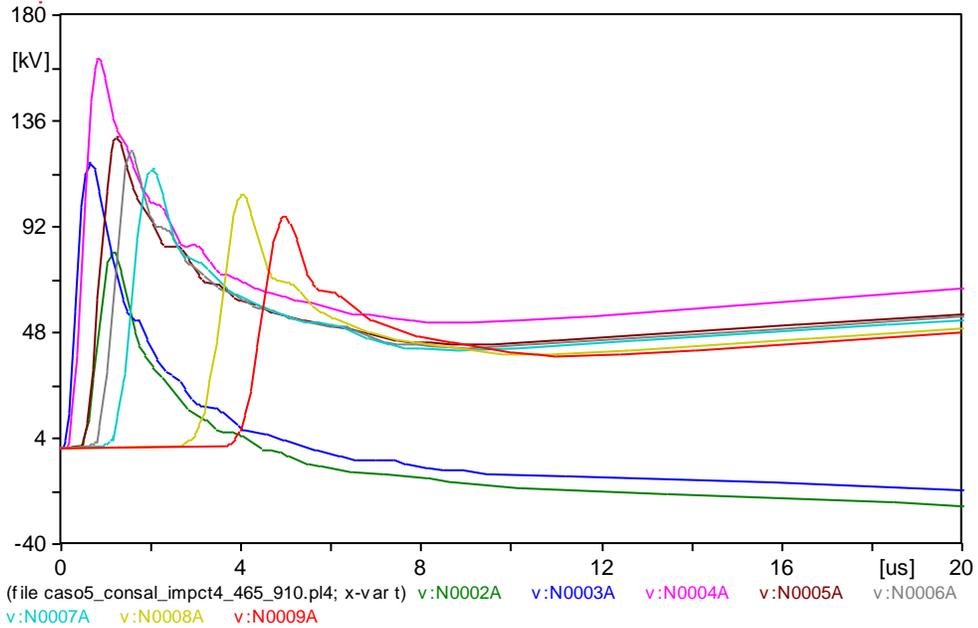
**Figura 3-16** Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3

En la Figura 3-17 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre la topografía del municipio de Teorama. El tiempo de simulación es 6  $\mu$ s.



**Figura 3-17** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3

En la Figura 3-18 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo para terreno plano.



**Figura 3-18** Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3

En la Tabla 3-8 se presentan los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el tercer impacto. Se presenta también la relación entre las tensiones obtenidas para terreno plano y terreno no-plano.

**Tabla 3-8:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama). Impacto 3

Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [μs]	Tensión [kV]	Tiempo [μs]	Tensión
1	-	-	51.87	3.52	-
2	156.40	1.45	81.50	1.15	0.52
3	187.30	0.77	118.77	0.64	0.63
4	207.30	0.77	161.70	0.83	0.78
5	183.30	1.27	129.37	1.20	0.71
6	176.60	1.72	123.31	1.55	0.70
7	190.90	2.34	115.78	2.01	0.61
8	174.60	4.67	105.13	4.03	0.60
9	178.10	5.98	96.04	4.96	0.54

En los resultados obtenidos se observa que a diferencia de los impactos anteriores, en este caso en que la descarga ocurre cerca a la línea sobre el valle que recorre el circuito en medio de las montañas, con una diferencia de altura máxima entre el impacto y el tramo que apenas supera los 50 m, las tensiones inducidas en terreno no-plano son considerablemente mayores a las tensiones inducidas de terreno plano. En el nodo 4 que es el más cercano al impacto (52 m), la tensión de terreno plano es 21% menor que para terreno no-plano. En los nodos 1 y 9 (los más alejados del impacto), la tensión inducida para terreno plano es prácticamente la mitad que la tensión inducida de terreno no-plano. La tendencia es similar a la observada en el tercer impacto del el tramo El Tarra donde las tensiones inducidas también eran mayores para terreno no-plano, sin embargo en este caso las relaciones entre plano y no-plano son menores. Lo anterior encuentra explicación al analizar la configuración del impacto y la topografía del terreno. El tramo y el impacto están sobre el valle entre dos cerros, entonces las ondas electromagnéticas que viajan por el terreno al encontrar las montañas se reflejan y regresan nuevamente hacia el tramo generando tensiones inducidas más altas, algo que no ocurre en el impacto de El Tarra. Se mantiene en ambos casos que para impactos cercanos, las tensiones inducidas en terreno no-plano son mayores que las de terreno plano.

En este caso, para terreno plano las sobretensiones más altas se presentan en los nodos 3, 4 y 5 que son los más próximos al impacto. Los valores más bajos se presentan en los nodos 1 y 9 que son los más distantes. Esta relación de tensión inducida - proximidad al impacto, no se da puntualmente en terreno no-plano. Por ejemplo el nodo 7 registra la segunda mayor tensión inducida siendo el cuarto nodo más alejado. Al ver la topografía se observa que este nodo es el más cercano a una tercera montaña que está hacia el sur-occidente del tramo.

Se puede concluir para este caso que la topografía del terreno es determinante en la inducción. La reflexión de las ondas electromagnéticas en las montañas provoca tensiones inducidas más altas, situación que no ocurre en los impactos anteriores que se dan en los picos de las montañas. Ahora bien, para impactos cercanos y con diferencias de altura entre nodos e impacto menores a 50 m aproximadamente, las tensiones inducidas son mayores en terreno no-plano.

### 3.1.3 Tramo Consal -Teora:

A continuación se presentan las simulaciones del tramo de circuito Consal - Teora sobre el municipio de San Calixto para terreno plano y sobre la topografía real del terreno (no-plano). Para todos los casos de simulación en los extremos del tramo (nodos 1 y 8), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea. La altura de los nodos sobre el terreno respecto al punto más bajo (tomando ese punto como referencia 0 m) se presentan en la Tabla 3-9 (aplica para terreno no plano).

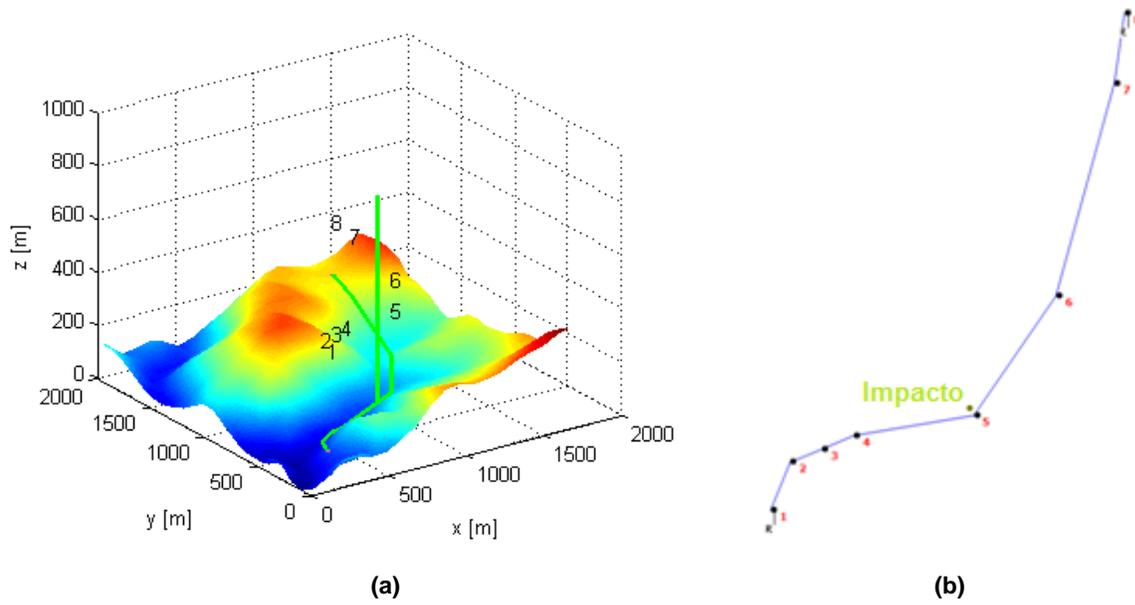
**Tabla 3-9:** Altura de nodos tramo Consal - Teora

Nodo	Altura [m]
1	75
2	65
3	80
4	75
5	140
6	165
7	230
8	255

De la tabla puede observarse que los nodos 1 a 4 están a una altura entre 65 y 80 m es decir, sobre terreno valle. Los nodos 5 a 8 se encuentran a más de 140 m sobre montaña.

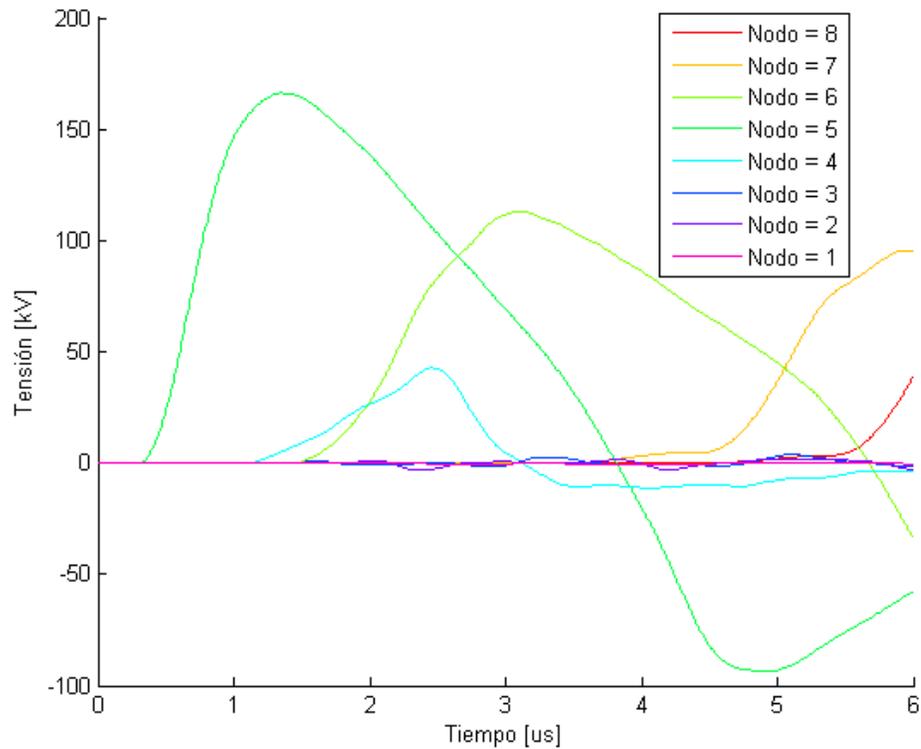
#### 3.1.3.1 Impacto 1

En la Figura 3-19 se muestra el tramo del circuito Consal - Teora sobre la topografía real del municipio de San Calixto (a) y la configuración para terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 55 m al occidente y 55 m al norte del nodo 5 (impacto cercano a la línea). El impacto ocurre muy cerca al nodo 5 (a 80 m aproximadamente) entre dos cerros y a una altura de 97 m. La máxima diferencia de altura entre los nodos y el terreno donde impacta es 158 m. La descarga de rayo se indica con la línea vertical de color verde. Para terreno plano la descarga se indica con el punto verde.



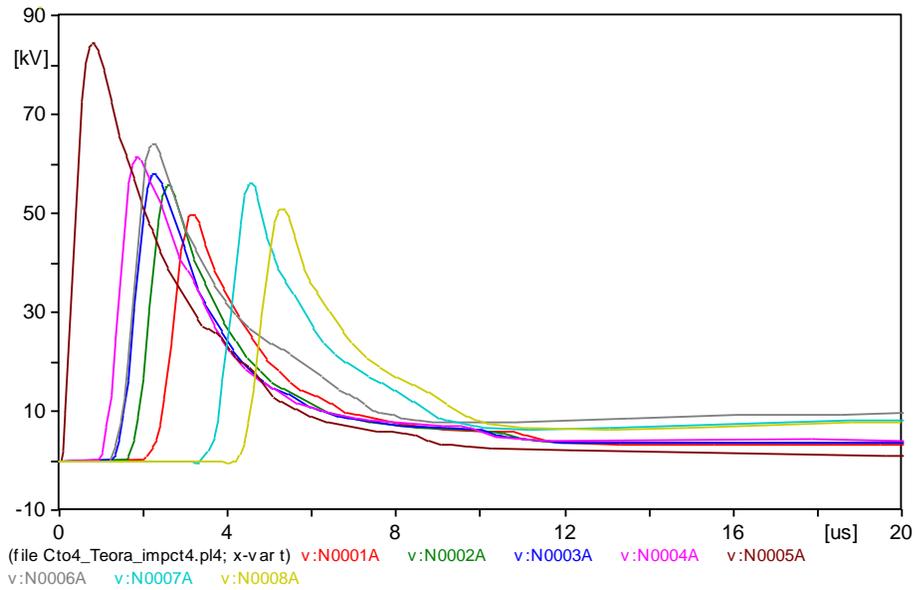
**Figura 3-19** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1

En la Figura 3-20 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo el Tarra (San Calixto) sobre la topografía real del terreno, transcurridos 6  $\mu$ s.



**Figura 3-20** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1

En la Figura 3-21 se muestra la respuesta de tensiones inducidas en cada uno de los nodos en el tramo del circuito Consal - Teora (San Calixto) asumiendo terreno plano.



**Figura 3-21** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1

Los valores máximos de tensiones inducidas para el impacto 1 se resumen en la Tabla 3-10. Se presenta además la relación entre los valores obtenidos para tensiones inducidas (Plano / No-plano).

**Tabla 3-10:** Tensiones inducidas tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1

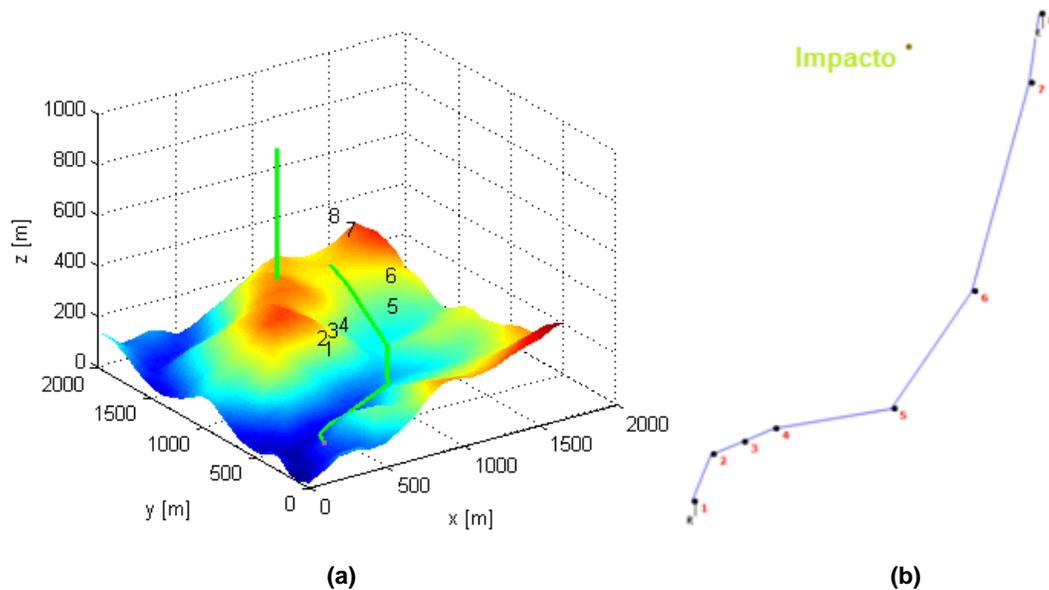
Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [μs]	Tensión [kV]	Tiempo [μs]	Tensión
1	-	-	49.68	3.16	-
2	-	-	55.73	2.60	-
3	-	-	58.12	2.24	-
4	42.75	2.47	61.45	1.84	1.44
5	166.30	1.34	84.49	0.80	0.51
6	113.10	3.09	64.18	2.22	0.57
7	95.65	5.94	56.08	4.54	0.59
8	-	-	50.93	5.28	-

En los resultados se destaca en primer lugar que no fue posible obtener respuesta en todos los nodos, por lo cual el análisis se basará en las respuestas obtenidas. En la tabla

se puede ver que a excepción del nodo 4, las tensiones inducidas son mayores en terreno no-plano que en terreno plano. Al analizar la configuración de terreno no-plano se tiene que el nodo 4 se encuentra en terreno valle a una altura de 75, mientras los nodos 5 a 8 están sobre montaña a más de 140 m. El impacto ocurre a 97 m entre montañas.

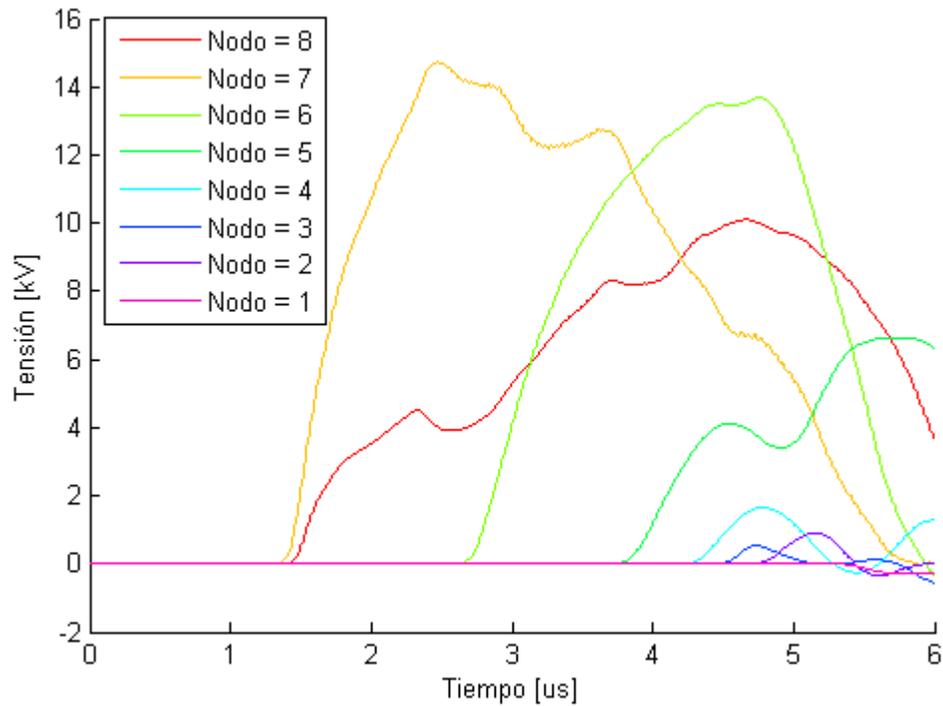
### 3.1.3.2 Impacto 2

En la Figura 3-22 se muestra un segundo caso de impacto en cerca al tramo Consal - Teora sobre la topografía del municipio de San Calixto para terreno no-plano (a) y sobre terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 379 m hacia el occidente y 118 m al norte del nodo 7. La altura del terreno en el punto de impacto en terreno no-plano es 275 m. La diferencia de altura entre los nodos 1 a 4 y el terreno es al menos 195 m, mientras la diferencia máxima en altura entre los nodos 5 a 8 y tramo es 135 m. La descarga ocurre en el pico de la montaña que está al norte del tramo (impacto alejado de la línea).



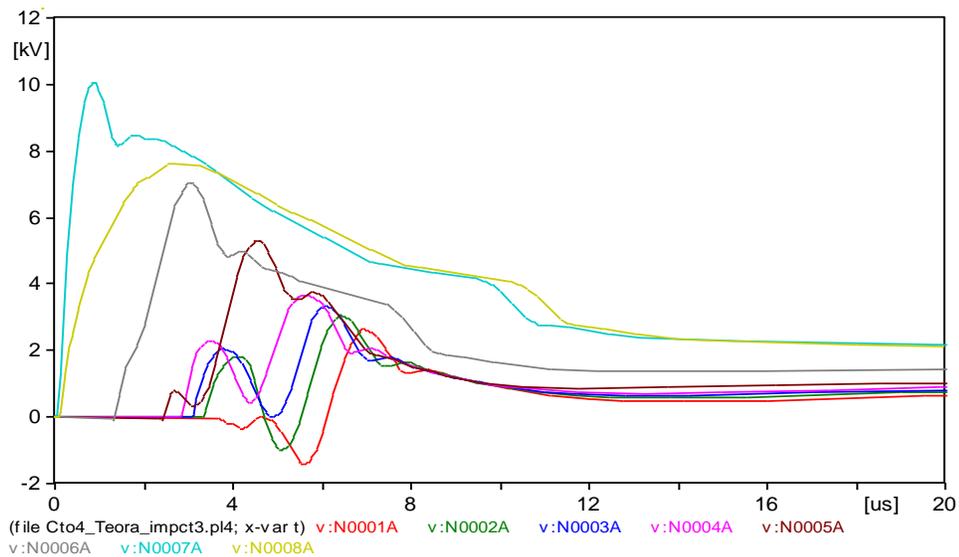
**Figura 3-22** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2

En la Figura 3-23 se muestra la respuesta de tensiones inducidas que se obtuvieron en los nodos en el tramo del circuito para terreno no-plano.



**Figura 3-23** Tensiones inducidas terreno no-plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2

En la Figura 3-24 se muestra la respuesta de tensiones inducidas en los nodos del tramo del circuito Consal - Teora (San Calixto) para terreno plano.



**Figura 3-24** Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2

Los valores de tensiones inducidas máximas para el circuito Consal - Teora (San Calixto) sobre terreno plano y no-plano se resumen en la Tabla 3-11.

**Tabla 3-11:** Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2

Nodo	Terreno No-plano		Terreno Plano		Relación Plano / No-plano
	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión [kV]	Tiempo [ $\mu$ s]	Tensión
1	-	-	2.63	6.98	-
2	0.91	5.15	3.05	6.45	3.37
3	0.54	4.73	3.33	6.10	6.19
4	1.65	4.78	3.66	5.68	2.22
5	6.64	5.65	5.30	4.54	0.80
6	13.68	4.76	7.05	3.04	0.52
7	14.72	2.47	10.07	0.90	0.68
8	10.11	4.67	7.62	2.70	0.75

En los resultados presentados en la Tabla 3-11 se observa en particular que la relación plano / no-plano es mayor en los nodos 2, 3 y 4 pero menor en los nodos 5 a 8. Al observar el trazado del tramo sobre la topografía, se tiene que los nodos 2 a 4 están a una altura entre 65 y 80 m recorriendo el valle (al menos 195 m más bajos), y a una distancia no menor a 1225 m del punto de impacto. De otra parte los nodos 5 a 8 están a una altura igual o superior a 140 m sobre la montaña ( diferencia máxima en altura de 135 m), y a menos de 1100 m de la descarga. Se observa nuevamente que la diferencia de altura entre los nodos y el impacto parece ser determinante en los resultados entre plano / no-plano. Para este caso los nodos que presentan una mayor tensión en no-plano están máximo 135 m más bajos que el terreno donde impacta el rayo.

Ahora bien, al analizar los resultados de terreno plano se observa que la tensión inducida aumenta en relación a la cercanía del nodo al impacto. El nodo 7 que está a 397 m del impacto registra 10 kV (mayor tensión), siguen el nodo 8 a 419 m con 7.62 kV, el nodo 6 a 775 m con 7 kV. Dado que la diferencia principal entre los dos casos de simulación es la consideración de la topografía (ubicación nodos sobre el terreno), se puede afirmar que la topografía de montaña sobre la cual están los nodos 5 a 8 está causando una mayor tensión inducida en terreno no-plano que en terreno plano.

## 4. Tensiones inducidas para terreno plano y no plano incluyendo elementos de circuito

En este capítulo se analizará la respuesta de las tensiones inducidas por rayo, incluyendo elementos de circuito tales como transformadores y descargadores de sobretensión en los tramos de las líneas de distribución seleccionados en el capítulo 2 y simulados en el capítulo 3. Al igual que en el capítulo anterior las simulaciones se realizarán sobre la topografía real del terreno para terreno no-plano, y asumiendo terreno plano. Se busca comparar las tensiones inducidas obtenidas entre terreno plano y no-plano, y además comparar las tensiones inducidas que se obtengan con las respuestas obtenidas en el capítulo anterior donde se consideró únicamente la línea sin elementos.

### 4.1 Casos de Simulación

En esta sección se obtienen las tensiones inducidas para los tramos seleccionados en el capítulo 2 y simulados en el capítulo 3, incluyendo transformadores y descargadores en cada tramo de circuito. Cabe recordar que en el capítulo anterior las simulaciones solo consideraron la línea. Las características de línea se mantienen iguales. El radio del conductor es de 5 mm, la altura es igual a 10 m sobre el terreno y la resistencia de la línea es  $0.253 \Omega$ . En los extremos del tramo de circuito se mantienen las impedancias cercanas a la impedancia característica de la línea ( $497.3 \Omega$ ) buscando evitar las reflexiones de las ondas que alteren los valores de tensiones inducidas. El terreno es de conductividad finita igual a  $0.01 \text{ S/m}$ , característica en Norte de Santander por el tipo de suelo erosivo y húmedo [60]. Se simulará una descarga de retorno subsecuente con  $I_0 = 12 \text{ kA}$  y  $di/dt = 12 \text{ kA}/\mu\text{s}$ , que se representa con una función de Heidler con los siguientes parámetros:  $I_{01} = 10.7 \text{ kA}$ ,  $\tau_{11} = 0.25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{12} = 2.5 \mu\text{s}$ ,  $I_{02} = 6.5 \text{ kA}$ ,  $\tau_{21} = 2.1 \mu\text{s}$ ,  $\tau_{22} = 230 \mu\text{s}$ ,  $n = 2$ . Se utilizará un modelo TL para representar la variación de la corriente a lo largo del canal, una altura del canal de 8 km y una velocidad de la descarga

de retorno de  $120 \text{ m}/\mu\text{s}$ . Se escoge un paso de  $\Delta_r = \Delta_z = 5$  para el cálculo del campo electromagnético producido por el rayo por el método de diferencias finitas. Como se mencionó en el capítulo anterior, se tomaron los mismos valores de corriente usados en la literatura internacional (Nucci)[46] [47]. Esta forma de onda permite que la tensión inducida tenga un tiempo de cola corto para que la ventana de tiempo de simulación esté limitada entre 5 y 6  $\mu\text{s}$ , por limitaciones de capacidad computacional.

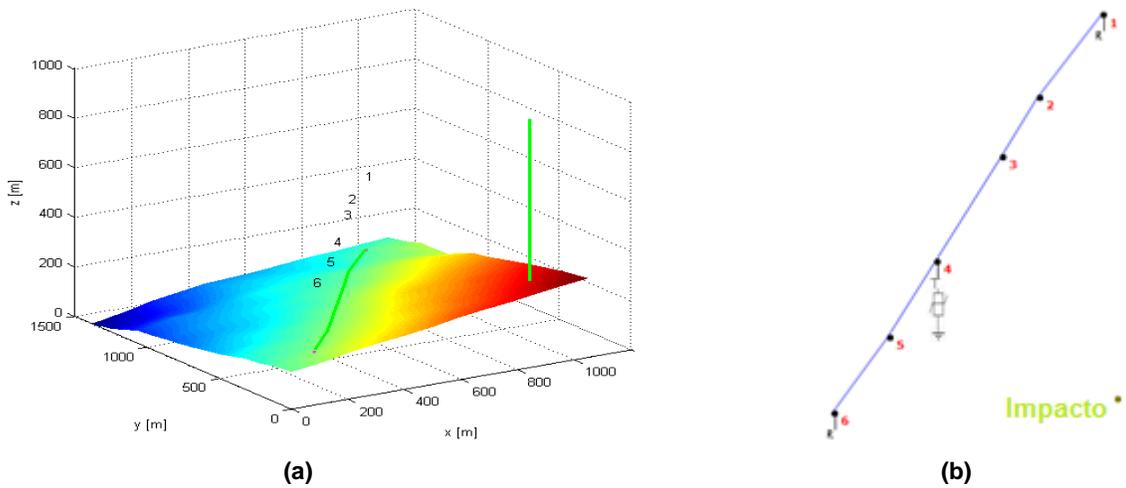
Para comparar las respuestas obtenidas en las simulaciones sin elementos y con elementos, los puntos de impacto para terreno plano y no-plano son los mismos descritos en el capítulo 3 para cada caso. En resumen, para las simulaciones que se presentan a continuación se mantienen en todos los casos los trazados, los puntos de impacto, las características de línea, las características de la descarga y demás consideraciones tomadas en el capítulo 3. La única diferencia será la inclusión de transformadores y descargadores de sobretensión en ciertos nodos que se describirá en cada caso.

#### **4.1.1 Tramo El Tarra:**

En este caso se presentan las simulaciones para el tramo seleccionado sobre el municipio de El tarra. En el nodo 4 del tramo hay un transformador de 15 kVA y consecuentemente un descargador de sobretensiones. En los extremos del tramo (nodos 1 y 6), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea igual a  $497.3 \Omega$ .

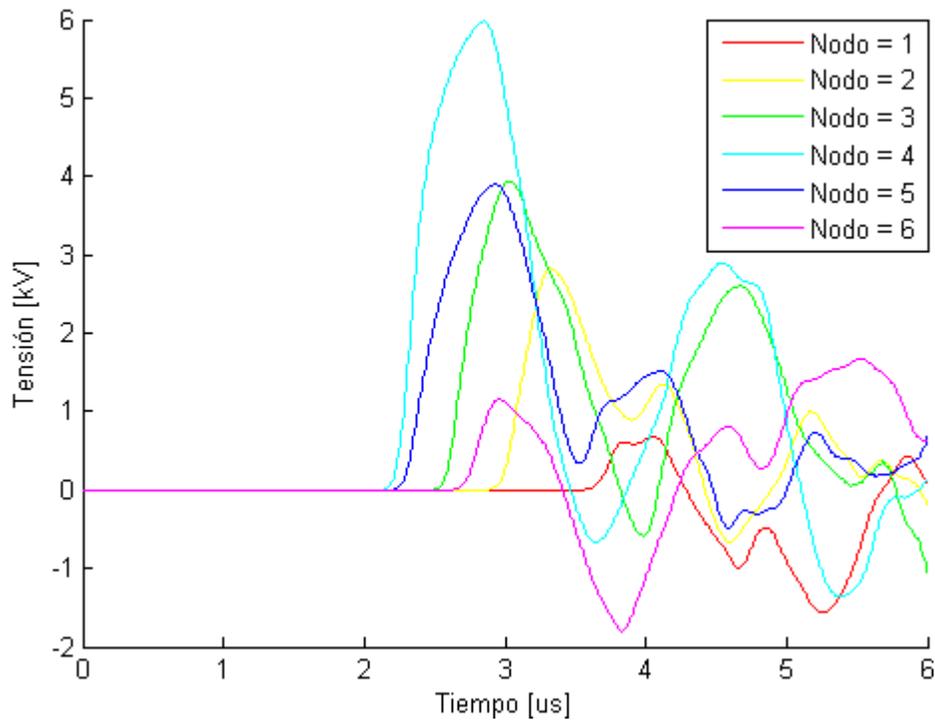
##### **4.1.1.1 Impacto 1**

En la Figura 4-1 se muestra el trazado del tramo para terreno no-plano (a) y terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 782 m al oriente y 46 m al norte del nodo 6 (impacto lejano). Para terreno no-plano, el impacto ocurre en el pico de la montaña al oriente del circuito a una altura de 285 m.



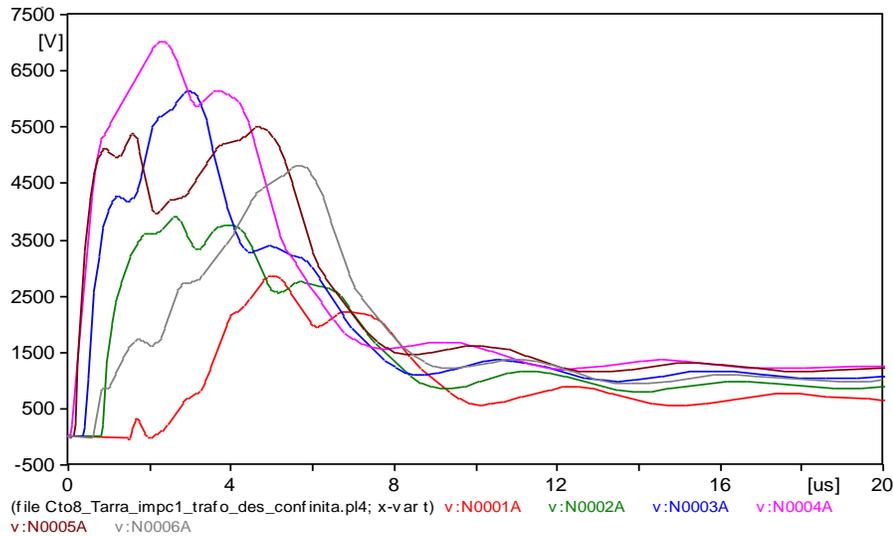
**Figura 4-1** Configuración terreno no-plano (a) y terreno plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1

En la Figura 4-2 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano.



**Figura 4-2** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1

En la Figura 4-3 se muestra la respuesta de tensiones inducidas para terreno plano.



**Figura 4-3** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 1

La Tabla 4-1 resume las tensiones inducidas máximas del primer impacto en los nodos del tramo El Tarra para terreno plano y no-plano, considerando el transformador y el descargador en el nodo 4. Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre terreno plano y no-plano, y las relaciones para terreno plano y no-plano entre tensiones inducidas sin elementos y con elementos.

**Tabla 4-1:** Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 1

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No-Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No-Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	-1.56	-1.56	2.85	3.56	1.83	1.00	0.80
2	2.83	2.83	3.91	4.85	1.38	1.00	0.81
3	3.94	3.94	6.15	7.04	1.56	1.00	0.87
4	5.98	4.88	7.02	7.74	1.17	1.22	0.91
5	3.90	3.90	5.51	6.29	1.41	1.00	0.88
6	-1.80	-1.83	4.83	4.24	2.68	0.98	1.14

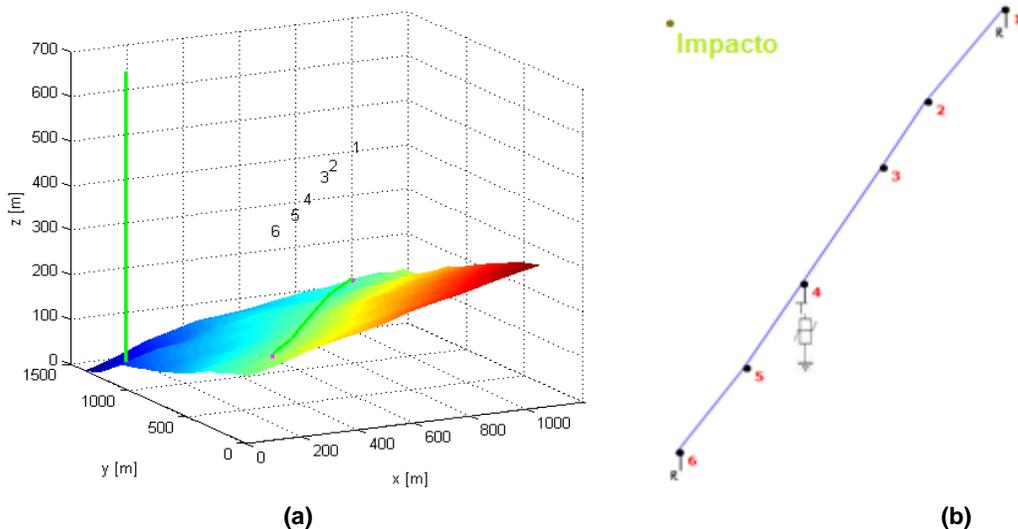
En los resultados se observa que las tensiones inducidas obtenidas para terreno plano son mayores que para terreno no-plano. En ambos casos, las sobretensiones más altas se presentan en los nodos 3 y 4, siendo estos los que se encuentran más cerca al punto

de impacto (distancia lineal). Consecuentemente, las menores sobretensiones se presentan en los nodos 1 y 6. En ambos casos la sobretensión obtenida en el nodo 1 es la menor de todas.

Ahora bien, al comparar las tensiones en terreno no-plano, se observa que el único nodo que presenta un cambio notorio es el nodo 4 que tiene el transformador y el descargador, los demás nodos se mantienen igual. En el nodo 4 la tensión es menor para el caso sin elementos, al incluirlos se obtuvo un aumento del 20% en la tensión del nodo. Por la lejanía del impacto no hay acción del descargador, tan solo se nota el efecto del transformador sobre el nodo 4. Por otro lado si se comparan las tensiones en terreno plano, se observa en general que las tensiones disminuyen en el caso con elementos, sin embargo la disminución del nodo 4 es más baja, apenas un 9%. En este caso los nodos restantes a excepción del nodo 6 presentaron una disminución entre 12 y 20%.

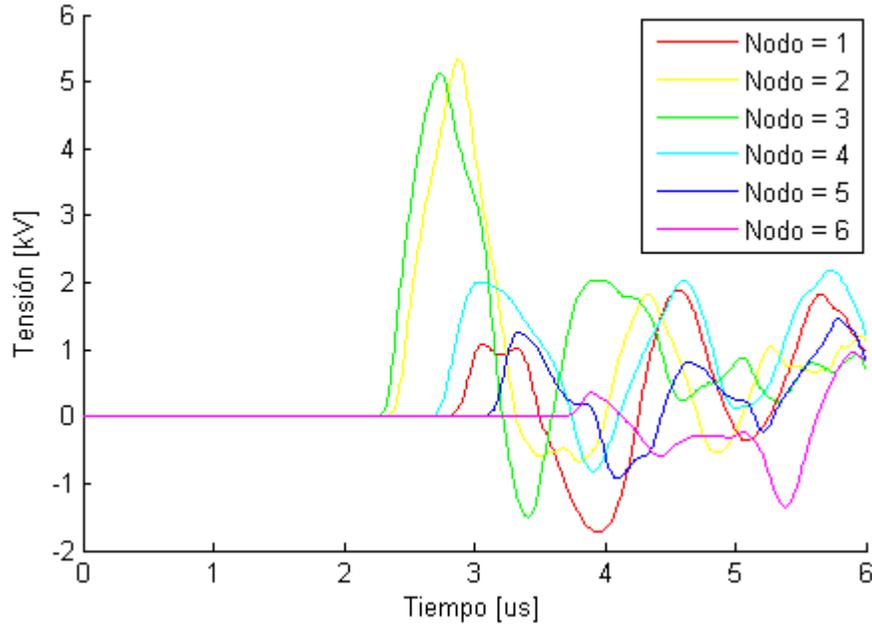
### 4.1.1.2 Impacto 2

En la Figura 4-4 se muestra la segunda descarga de rayo en cercanías del tramo de circuito de El Tarra, para terreno no-plano (a) y terreno plano (b). El rayo impacta a 73 m al occidente y 1081 m al norte del nodo 6 (impacto alejado). En terreno no-plano el impacto se da sobre la ladera de la montaña, al occidente del tramo a una altura de 25 m.



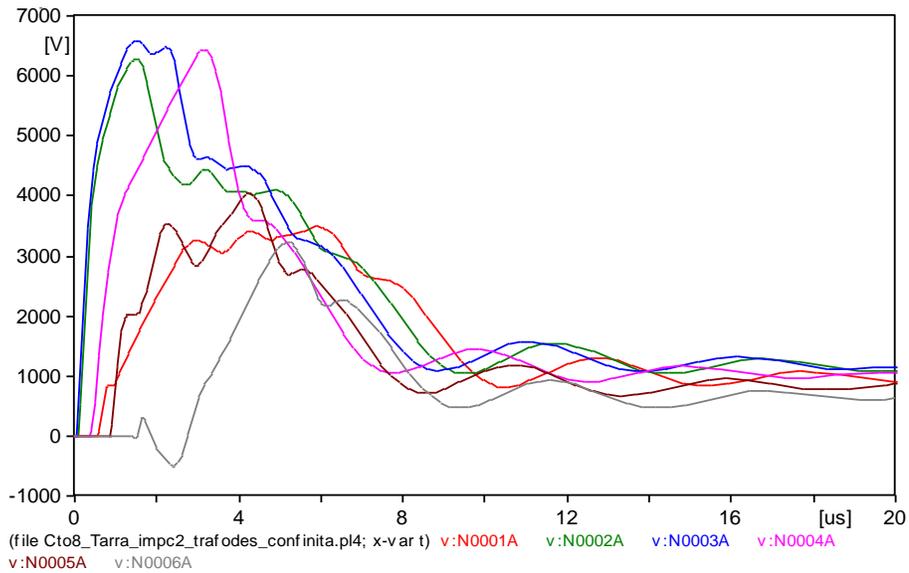
**Figura 4-4** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2

La Figura 4-5 presenta la respuesta de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo El Tarra en terreno no-plano para un tiempo de simulación de 6  $\mu$ s.



**Figura 4-5** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2

En la Figura 4-6 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas para terreno plano.



**Figura 4-6** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 2

La Tabla 4-2 presenta los valores máximos de tensiones inducidas obtenidas para el segundo impacto. Adicionalmente se presentan las relaciones de comparación.

**Tabla 4-2:** Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 2

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No-Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos			
1	1.89	1.89	3.49	4.03	1.84	1.00	0.87
2	5.34	5.34	6.29	6.29	1.18	1.00	1.00
3	5.13	5.13	6.58	7.25	1.28	1.00	0.91
4	2.19	2.92	6.44	6.81	2.95	0.75	0.95
5	1.46	1.47	4.04	4.20	2.76	1.00	0.96
6	0.96	0.61	3.23	3.31	3.37	1.56	0.98

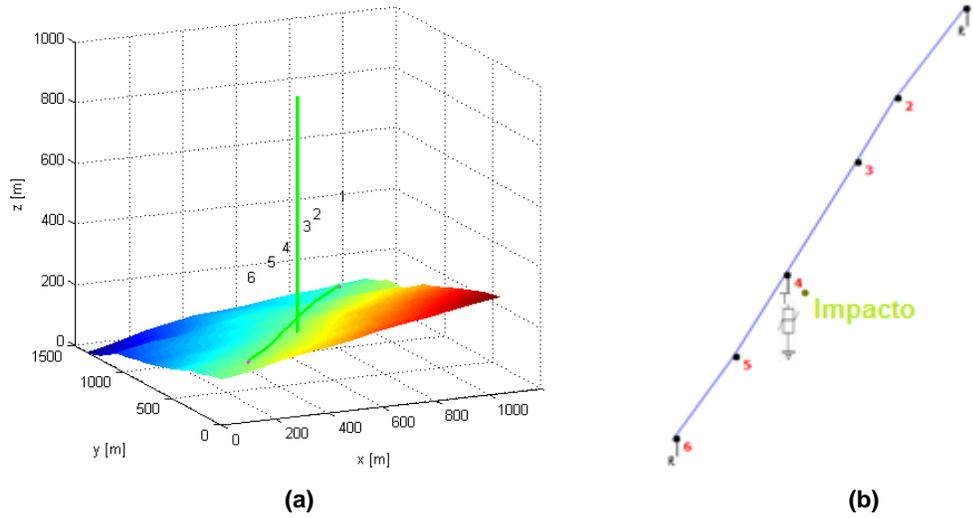
En la Tabla 4-2 se observa que al igual como ocurrió para el primer impacto, se obtienen tensiones mayores en terreno plano. Al comparar las tensiones en terreno no-plano, se observa de nuevo que el único nodo que presenta un cambio es el nodo 4. En este caso donde el impacto ocurre a una menor altura del tramo, lo que se refleja en una onda con pendiente positiva desde el impacto hacia el tramo, la tensión en el nodo 4 disminuyó 25% al incluir los elementos, mientras en el caso de impacto 1 que ocurría en lo alto de la montaña, a una altura mayor a la de la línea, la tensión en el nodo 4 aumentó 22%. Un comportamiento similar al del nodo 4 se da en el nodo 6 pero con resultados inversos. Los demás nodos no presentan ningún cambio en la tensión para terreno no-plano.

Analizando las relaciones de terreno plano se observa nuevamente una disminución en los resultados de las tensiones al considerar el transformador y el descargador del nodo 4. Las sobretensiones más bajas se presentan en los nodos 1 y 6, siendo la sobretensión obtenida en el nodo 6 la menor de todas en ambos casos (nodo más lejano de la descarga). En resumen, en terreno plano se nota el efecto del descargador en la disminución de las tensiones inducidas de los nodos, mientras en terreno no-plano solo se observa el efecto del transformador sobre el nodo 4.

### 4.1.1.3 Impacto 3

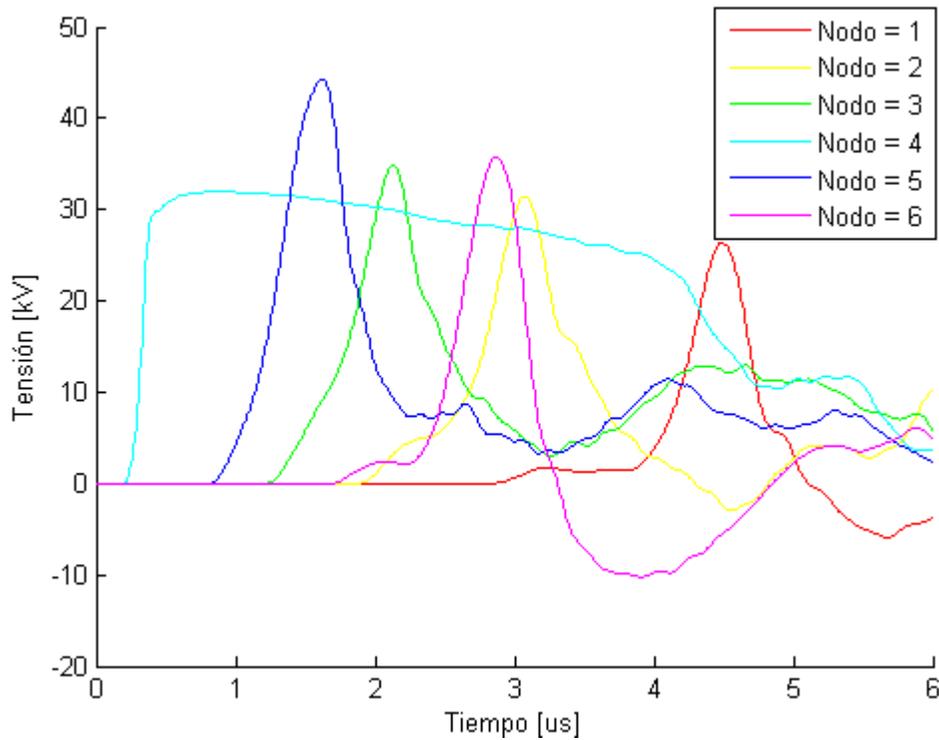
En la Figura 4-7 se observa el tercer impacto en cercanía al tramo El Tarra, incluyendo el transformador y el descargador en el nodo 4 en terreno no-plano (a) y terreno plano (b).

El rayo impacta sobre el terreno a 36 m al oriente y 42 m al sur del nodo 4 (impacto cercano a la línea).



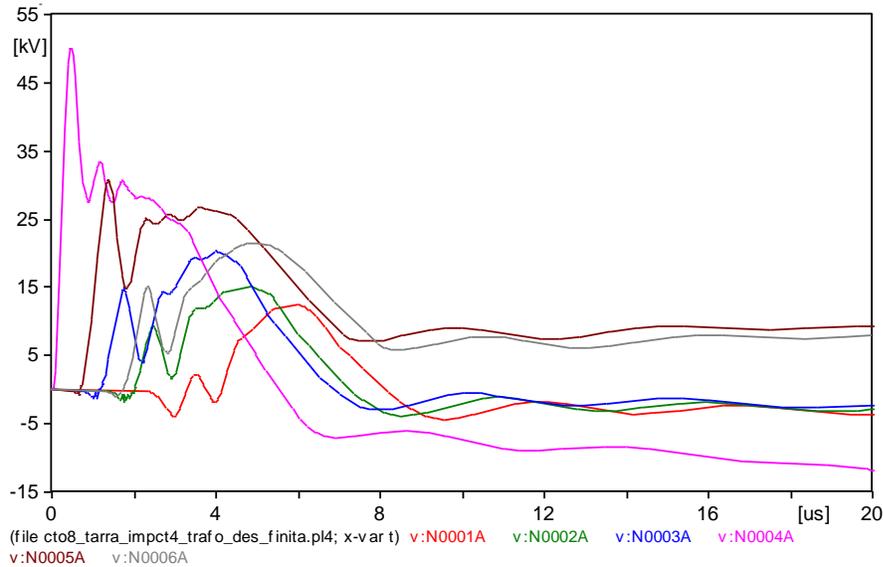
**Figura 4-7** Configuración terreno No-plano (a) y plano (b). Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3

En la Figura 4-8 se observa las tensiones inducidas obtenidas al considerar el transformador y descargador del nodo 4 para terreno no-plano.



**Figura 4-8** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3

En la Figura 4-8 se observa claramente en el nodo 4 la onda recortada por el efecto del descargador. En la Figura 4-9 se presenta las tensiones inducidas para terreno plano.



**Figura 4-9** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 3

En la onda del nodo 4 se observa el efecto del descargador limitando la tensión inducida. Se observa también el cambio en la onda de los demás nodos. En la Tabla 4-3 se presenta los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el tercer impacto. Se presenta la relación entre las tensiones obtenidas para terreno plano y terreno no-plano, y las relaciones de tensiones entre elementos y sin elementos.

**Tabla 4-3:** Tensiones inducidas tramo El Tarra con elementos. Impacto 3

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No-Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No-plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	26.39	54.94	12.40	43.48	0.47	0.48	0.29
2	31.46	61.95	15.04	52.19	0.48	0.51	0.29
3	34.85	65.42	20.31	57.67	0.58	0.53	0.35
4	31.96	87.37	50.10	86.26	1.57	0.37	0.58
5	44.30	61.49	30.64	71.52	0.69	0.72	0.43
6	35.79	51.27	21.47	55.95	0.60	0.70	0.38

En los resultados se observa que para este caso las tensiones obtenidas para terreno plano son menores en comparación con las de terreno no-plano exceptuando el nodo 4.

En los demás nodos, las tensiones en terreno plano son en promedio 56% menores que las tensiones inducidas para terreno no-plano. Al analizar los resultados del nodo 4 se tiene que el efecto del descargador sobre el este nodo es más significativo en terreno no-plano que para terreno plano. Mientras que al incluir los elementos en terreno no-plano la tensión en nodo 4 disminuye 63%, en terreno plano la disminución de la tensión en terreno plano tan solo es de 42%. Esto explica porque la relación entre plano y no-plano con elementos para este nodo en particular resulta mayor a 1. Por otra parte al igual que en el capítulo 3, las tensiones en terreno no-plano son mayores cuando la descarga ocurre cerca a la línea.

Al analizar las relaciones se puede afirmar que al incluir el descargador en el nodo 4, las tensiones disminuyen en todos los nodos, tanto para terreno plano como no-plano. Para el caso no-plano las tensiones en el tramo disminuyeron en promedio 45% al incluir los elementos. Para terreno plano las tensiones en el tramo disminuyeron en promedio 61% con respecto al caso sin elementos, sin embargo contrario al caso no-plano, el nodo 4 presentó la menor disminución (42%). De acuerdo a los resultados es posible inferir aunque en ambos casos se observa el efecto del descargador en todos los nodos, el efecto del descargador en terreno no-plano es mayor en el nodo que tiene el elemento, mientras en el terreno plano se observa una mayor incidencia en los demás nodos.

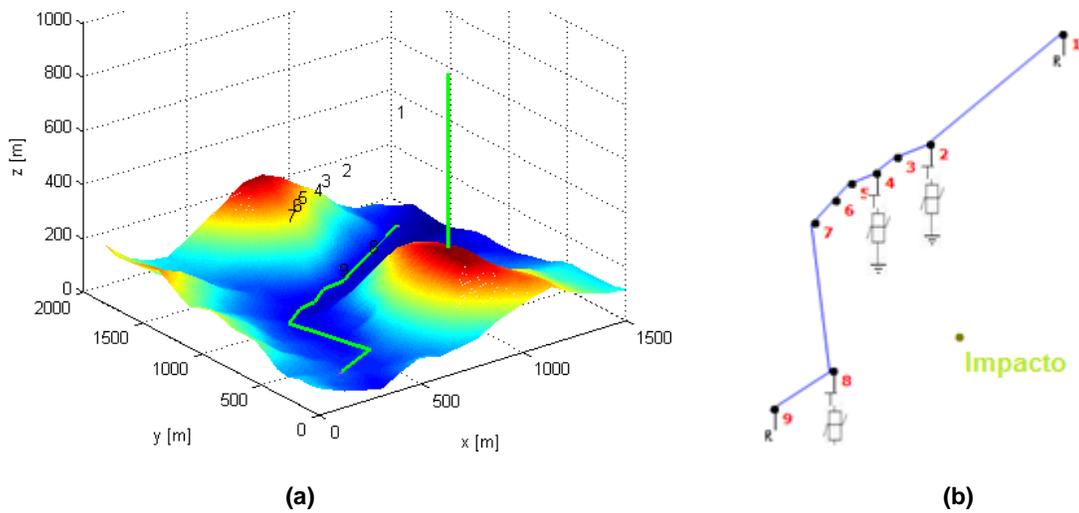
#### **4.1.2 Tramo Consal - San Pablo:**

En este caso se presentan las simulaciones para el tramo seleccionado del circuito Consal - San Pablo que recorre el municipio de Teorama, incluyendo en los nodos 2, 4 y 8 transformadores de 15 kVA y sus respectivos descargadores de sobretensiones. En los extremos del tramo (nodos 1 y 9), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea igual a  $497.3 \Omega$ .

##### **4.1.2.1 Impacto 1**

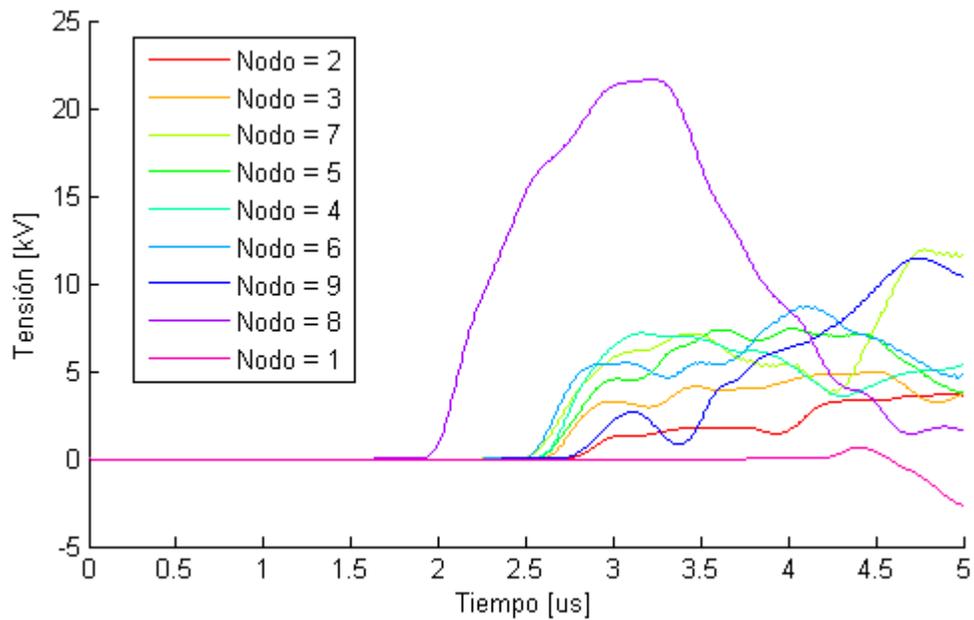
En la Figura 4-10 se muestra el tramo del circuito Consal-San Pablo para terreno no-plano(a) y terreno plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 463 m al oriente y 141 m al norte del nodo 8. En terreno no-plano (a) la descarga de rayo que se indica con la línea vertical de color verde, ocurre en el pico de la montaña que está al oriente del tramo a

una altura de 295 m. En terreno plano (b) la descarga se indica con el punto de color verde.



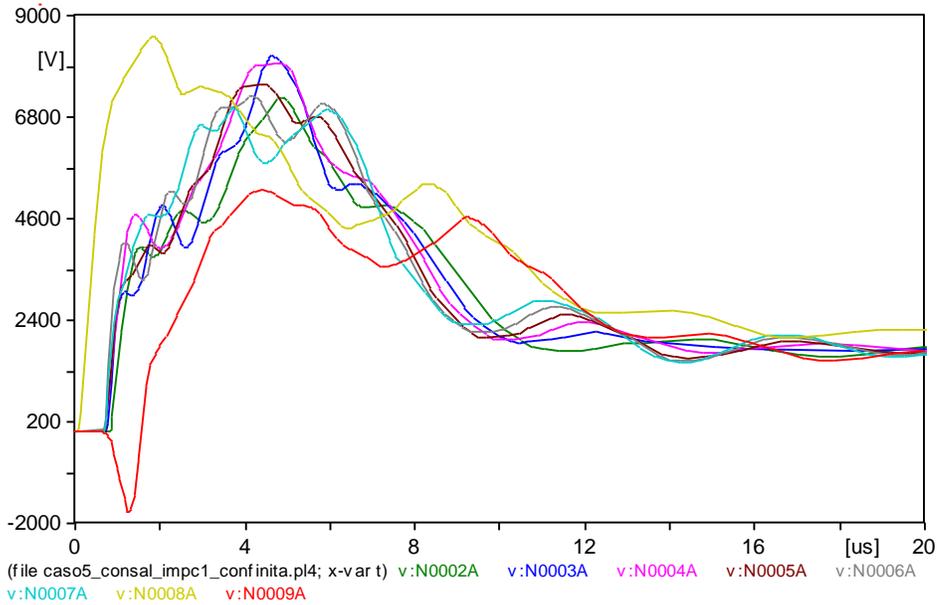
**Figura 4-10** Configuración terreno no-plano Consal-San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1

En la Figura 4-11 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo para un tiempo de simulación de 5  $\mu$ s en terreno no-plano.



**Figura 4-11** Respuesta terreno no-plano tramo Consal-San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1

En la Figura 4-12 se muestra la respuesta de tensiones inducidas para terreno plano, es decir, asumiendo que todos los nodos se encuentran a la misma altura sobre el terreno.



**Figura 4-12** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 1

En la Tabla 4-4 se presentan valores máximos de tensiones inducidas por el impacto 1 en los nodos del tramo Consal - San Pablo incluyendo elementos del circuito, para terreno plano y no-plano.

**Tabla 4-4:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 1

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No-plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	-	-2.87	4.66	5.37	-	-	0.87
2	3.68	4.80	7.23	8.50	1.97	0.77	0.85
3	5.00	5.23	8.12	9.17	1.62	0.96	0.89
4	7.17	5.78	7.98	9.40	1.11	1.24	0.85
5	7.44	5.78	7.52	9.35	1.00	1.29	0.80
6	8.74	5.89	7.26	9.35	0.83	1.48	0.78
7	11.95	6.19	7.00	9.23	0.59	1.93	0.76
8	21.67	17.98	8.53	9.70	0.39	1.21	0.88
9	11.48	4.85	5.21	5.05	0.45	2.37	1.00

En la Tabla 4-4 se observa que para el caso de impacto sobre el pico de la montaña, en los nodos 6 a 9 las tensiones inducidas son mayores para terreno no-plano, mientras que en los nodos 2, 3 y 4 son mayores para terreno plano. Ahora bien, analizando las

relaciones de terreno no-plano, la tendencia muestra que las tensiones aumentaron al incluir los elementos. Por la lejanía de la descarga respecto al tramo, el descargador no tiene ningún efecto, por lo cual se observa el aumento de las tensiones por efecto de los transformadores. Por otra parte, en terreno plano el comportamiento es contrario. Al incluir los descargadores de sobretensión, como es de esperarse, las tensiones inducidas en todos los nodos disminuyen. El único nodo que presenta un comportamiento invariante es el nodo 9 que está a 1662 m del punto de impacto. Nuevamente se observa el efecto del descargador en terreno plano aún cuando impacto se da en un punto alejado del tramo. Al considerar la topografía del terreno los descargadores no actúan dado que aumenta la distancia entre nodos e impacto, y como se vio en el capítulo 3, las tensiones inducidas son muy bajas.

### 4.1.2.2 Impacto 2

En la Figura 4-13 se muestra la segunda descarga de rayo en cercanías del tramo de circuito de Consal - San Pablo para terreno no-plano (a) y plano (b). El rayo impacta sobre el terreno a 51 m al oriente y 615 m al norte del nodo 3 (impacto alejado). En terreno no-plano la descarga ocurre en el pico de la montaña que está al noroccidente del tramo a una altura de 275 m.

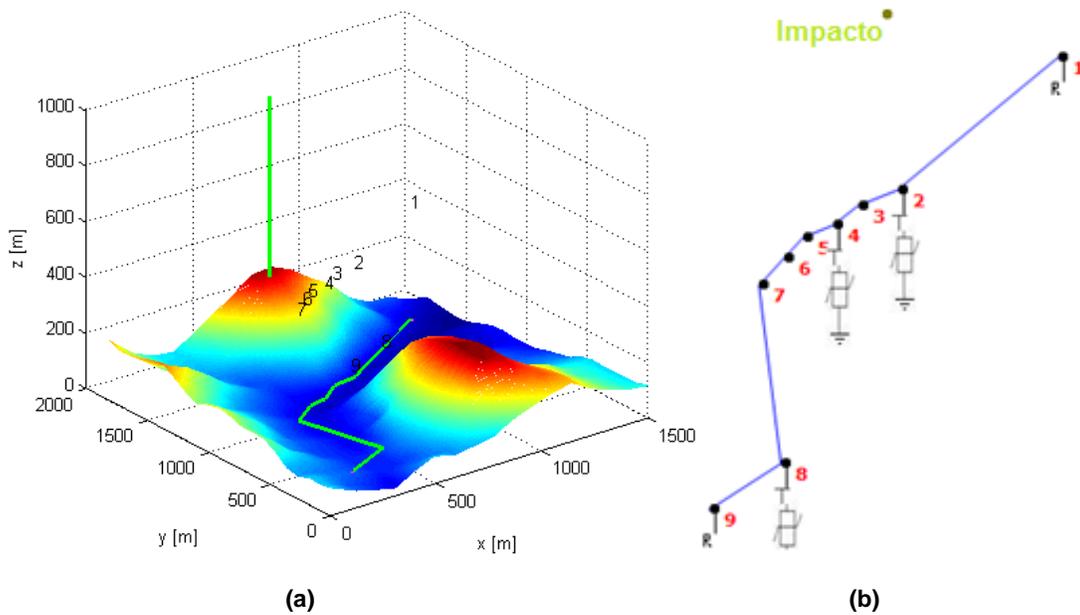
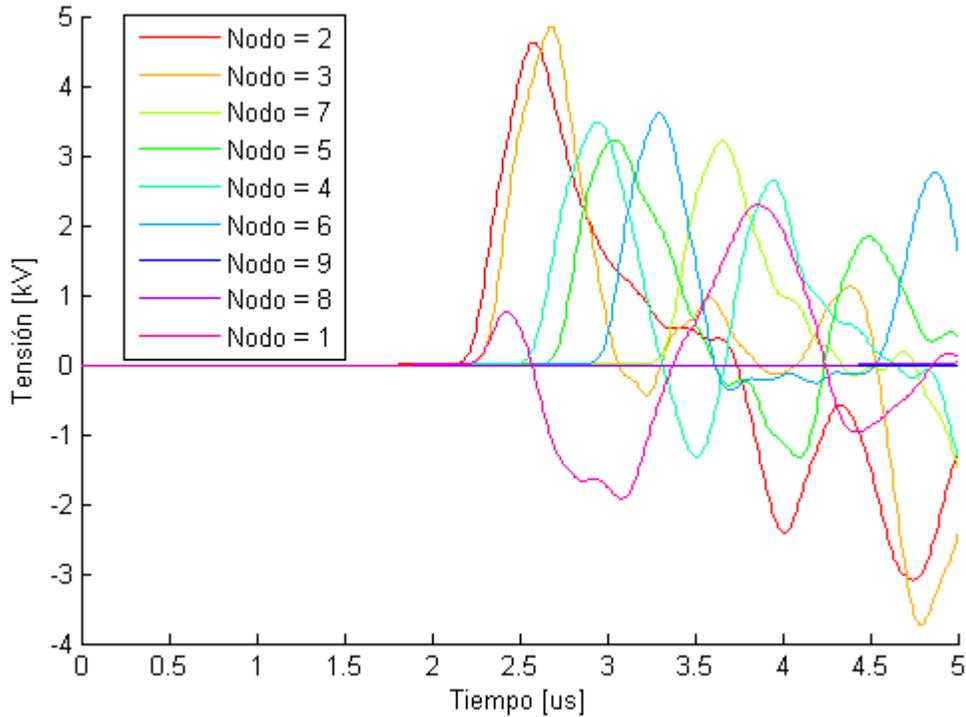


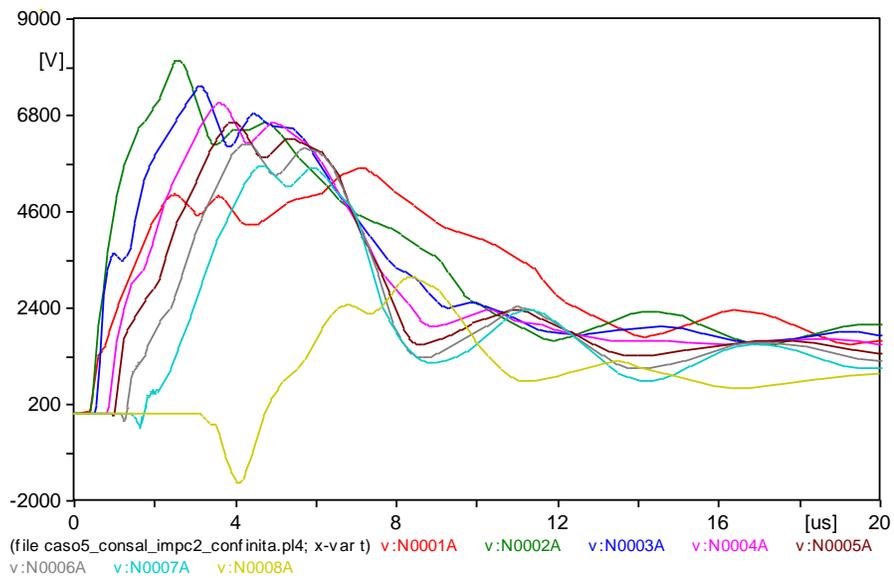
Figura 4-13 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal-San Pablo (Teorama). Impacto 2

En la Figura 4-14 se observa la respuesta de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo sobre el municipio de El Tarra para un tiempo de simulación de 5  $\mu$ s.



**Figura 4-14** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo con elementos. Impacto 2

En la Figura 4-15 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo del tramo Consal - San Pablo asumiendo terreno plano.



**Figura 4-15** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal-San Pablo con elementos. Impacto 2

En la Tabla 4-5 se presentan los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el segundo impacto en terreno plano y no-plano, al incluir elementos de circuito. Se presenta las relaciones entre terreno plano / no-plano y con elementos / sin elementos para ambas topografías.

**Tabla 4-5:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 2

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No-Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	2.29	-1.74	5.59	5.91	2.44	1.32	0.95
2	4.63	2.93	8.05	9.42	1.74	1.58	0.86
3	4.85	4.54	7.47	9.03	1.54	1.07	0.83
4	3.48	3.05	7.08	8.35	2.03	1.14	0.85
5	3.23	3.07	6.64	7.93	2.06	1.05	0.84
6	3.60	2.90	6.15	7.43	1.71	1.24	0.83
7	3.20	2.45	5.63	6.86	1.76	1.31	0.82
8	-	1.99	3.11	4.03	-	-	0.77
9	-	-	-3.09	3.47	-	-	0.89

En los resultados presentados en la Tabla 4-5 se observa que al igual que en caso sin elementos las tensiones en terreno no-plano son menores comparadas con las tensiones de terreno plano (impacto lejano a la línea). Por otra parte, en la relación para terreno no-plano puede verse que al incluir transformadores y descargadores en los nodos 2, 5 y 8, las tensiones inducidas experimentaron un ligero incremento respecto al caso sin elementos. Por el contrario, en terreno plano es notorio el efecto que tienen los descargadores en el decremento de las tensiones inducidas respecto al caso de terreno plano sin elementos de circuito. La disminución más alta se registra en el nodo 8 (23%) que cuenta con descargador de sobretensiones. En base a los resultados anteriores es posible afirmar que los impactos que ocurren en montaña, a una altura superior a la del tramo y una distancia considerable respecto al tramo, no permiten observar el efecto de los descargadores.

### 4.1.2.3 Impacto 3

La Figura 4-16 presenta la configuración en terreno no-plano (a) y plano (b) para el tercer caso de impacto. El rayo cae sobre el terreno a 50 m al oriente y 7 m al norte del nodo 4 (impacto cercano).

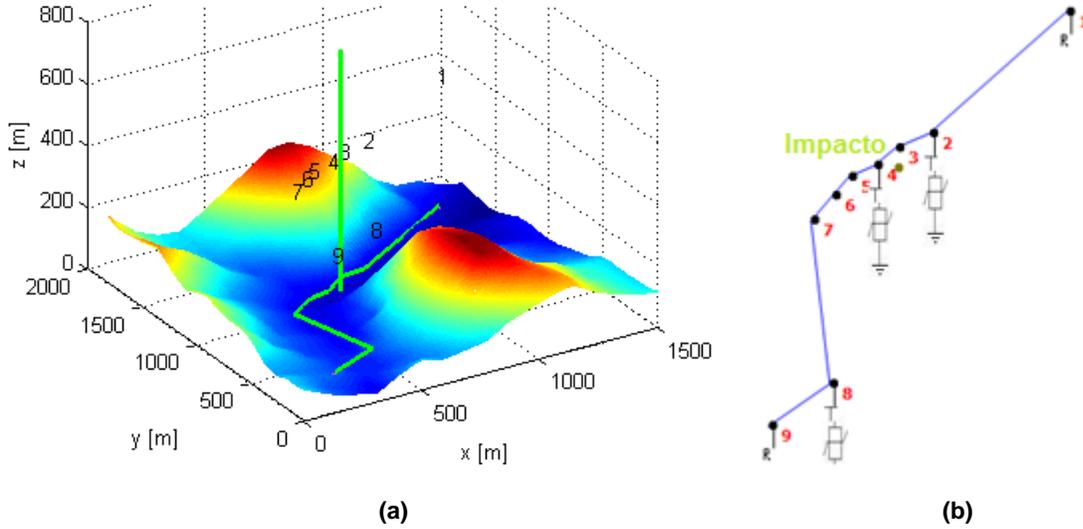


Figura 4-16 Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3

En la Figura 4-17 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo para terreno no-plano. El tiempo de simulación es 6  $\mu$ s.

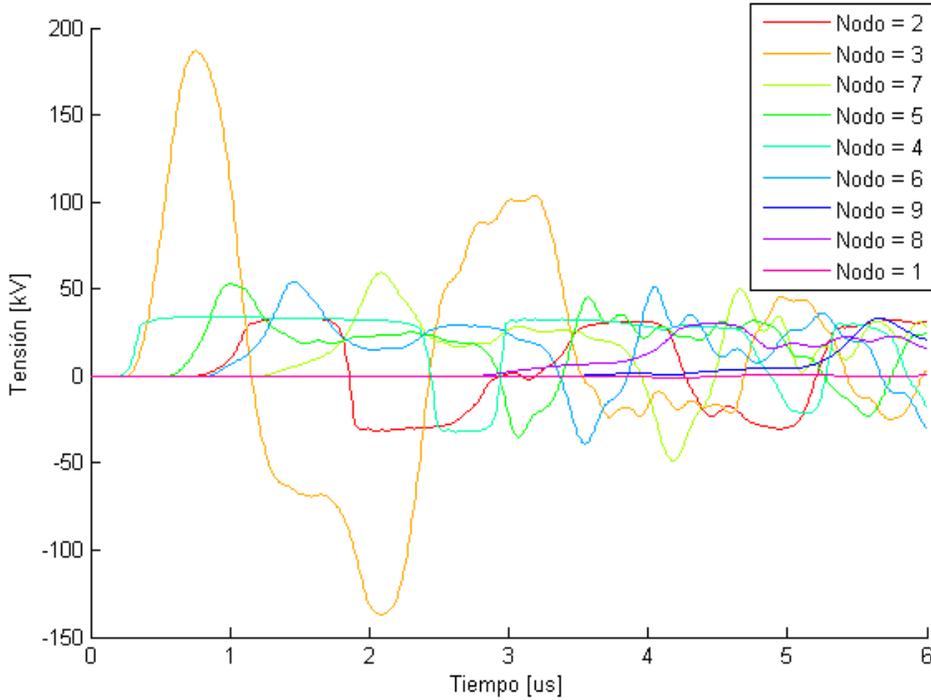
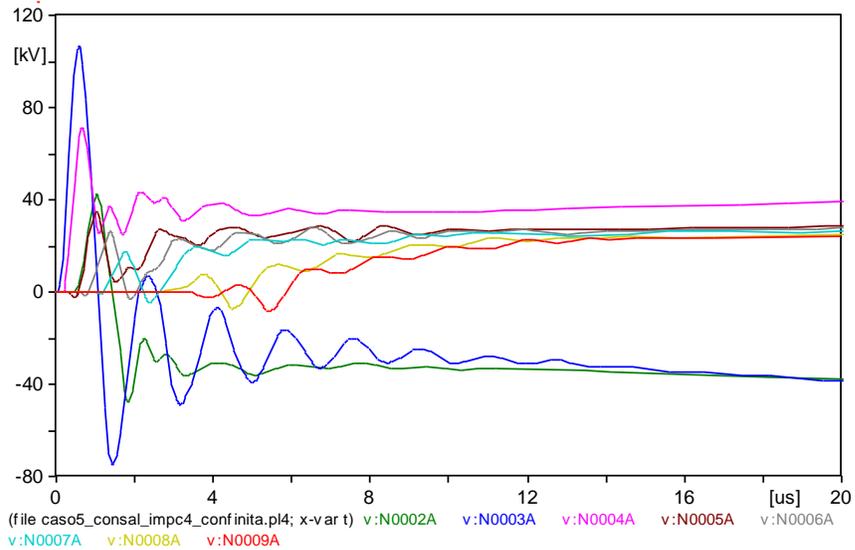


Figura 4-17 Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3

En la figura anterior se observa el efecto del descargador que recorta las ondas de la tensiones inducidas en los nodos 2, 4 y 8.

En la Figura 4-18 se presenta la respuesta de las tensiones inducidas en cada nodo para terreno plano.



**Figura 4-18** Tensiones inducidas terreno plano tramo Consal - San Pablo con elementos. Impacto 3

En la Tabla 4-6 se presentan los valores máximos de las tensiones inducidas obtenidas para el tercer impacto. Se presentan además las relaciones entre las tensiones obtenidas para terreno plano y terreno no plano, y las relaciones entre elementos y sin elementos.

**Tabla 4-6:** Tensiones inducidas tramo Consal - San Pablo (Teorama) con elementos. Impacto 3

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No-plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No- Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	-	-	-55.71	51.87	-	-	1.07
2	33.29	156.40	42.67	81.50	1.28	0.21	0.52
3	186.50	187.30	106.68	118.77	0.57	1.00	0.90
4	34.04	207.30	71.20	161.70	2.09	0.16	0.44
5	52.79	183.30	34.79	129.37	0.66	0.29	0.27
6	54.29	176.60	27.92	123.31	0.51	0.31	0.23
7	59.39	190.90	26.47	115.78	0.45	0.31	0.23
8	30.22	174.60	24.40	105.13	0.81	0.17	0.23
9	33.29	178.10	23.60	96.04	0.71	0.19	0.25

En los resultados obtenidos se observa que en general para este impacto (cercano a la línea) que ocurre sobre el terreno valle que recorre el circuito y que está rodeado por montañas al oriente y el occidente, las tensiones inducidas son significativamente menores en los casos en que se incluyen el transformador y el descargador en los nodos 2, 4 y 8. Este comportamiento es el esperado pues los descargadores limitan las sobretensiones en la línea. Ahora bien, las tensiones inducidas en terreno no-plano son mayores que las tensiones inducidas de terreno plano exceptuando los nodos 2 y 4 que cuentan con transformador y descargador. En el nodo 4 que es el más cercano al impacto (52 m), la tensión en terreno plano es dos veces que la tensión para terreno no-plano. En el nodo 2 que está a 186 m del impacto, la tensión en terreno plano es 28% más alta que la tensión en no-plano. En los demás nodos la tensión en terreno plano es en promedio el 62% de la tensión para terreno no-plano.

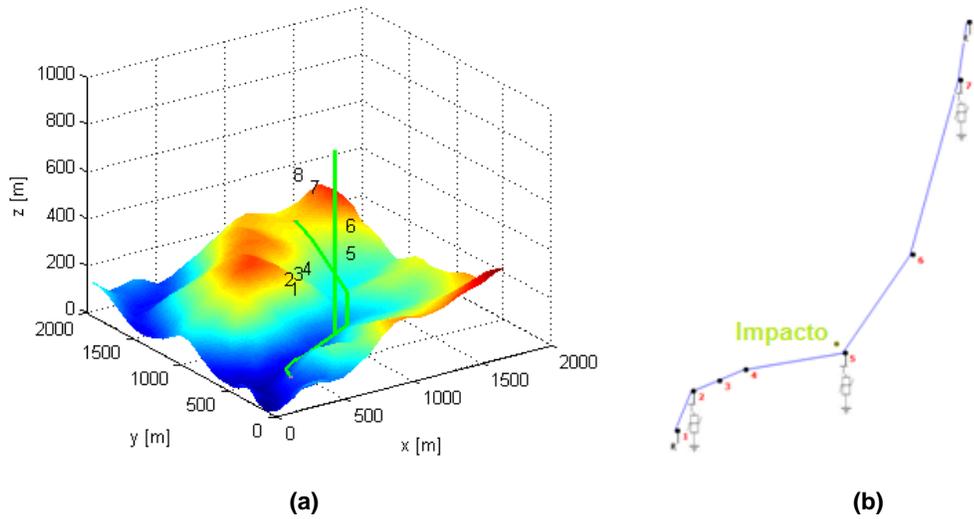
Al analizar en particular los nodos 2 y 4 se observa que el efecto del descargador en estos nodos al igual que en el nodo 8, es mayor en terreno no-plano que en terreno plano. Mientras que en terreno no-plano al incluir el descargador las tensiones en los nodos 2 y 4 disminuyen 79% y 84% respectivamente, para terreno plano esta disminución fue de 48% y 56% respectivamente. Por esta razón los resultados muestran una menor tensión en terreno no-plano aún cuando el impacto es cercano. Para terreno plano al incluir los elementos la mayor disminución con respecto a las tensiones del caso sin elementos la experimentan los nodos 6, 7 y 8 (77%). Se puede concluir nuevamente que en terreno no-plano el efecto de los descargadores es mayor en los nodos que tienen los descargadores, mientras en terreno plano la disminución de las tensiones inducidas es mayor en los nodos vecinos.

#### **4.1.3 Tramo Consal -Teora:**

A continuación se presentan las simulaciones del tramo de circuito Consal - Teora sobre terreno plano y sobre la topografía real del terreno (no-plano). Para todos los casos de simulación en los extremos del tramo (nodos 1 y 8), hay conectadas impedancias del mismo valor que la impedancia característica de la línea igual a  $497.3 \Omega$ . En los nodos 2, 5 y 7 se conectaron transformadores de 15 kVA y sus respectivos descargadores de sobretensión. Para el caso no-plano el tramo entre los nodos 1 y 4 se encuentra en terreno valle mientras el tramo entre los nodos 5 y 8, está sobre montaña.

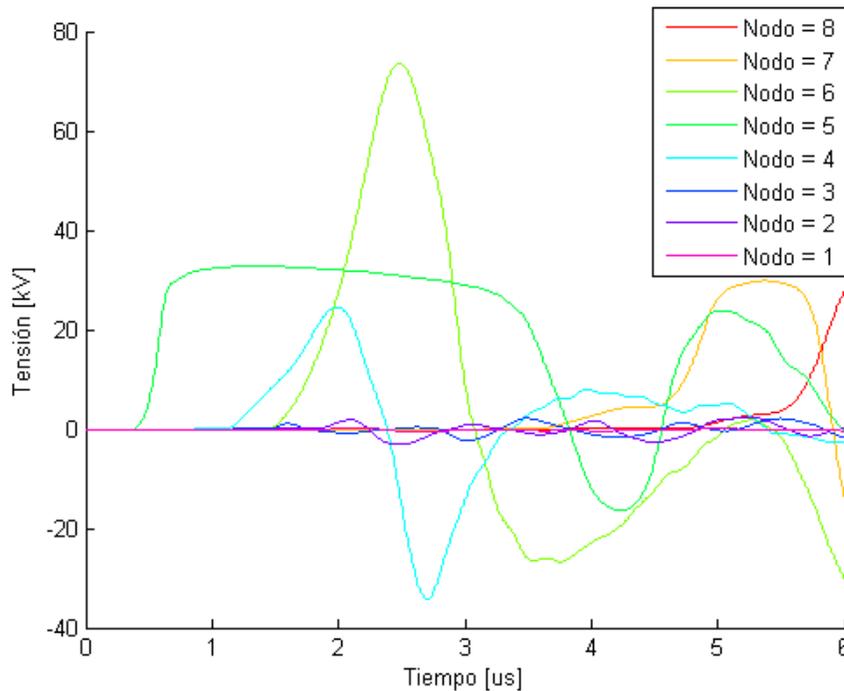
### 4.1.3.1 Impacto 1

En la Figura 4-19 se muestra la configuración del primer impacto sobre terreno no-plano (a) y terreno plano (b), incluyendo los elementos del circuito. El rayo impacta 55 m al occidente y 55 m al norte del nodo 5 (impacto cercano a la línea). El impacto ocurre a una altura de 97 m.



**Figura 4-19** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 1

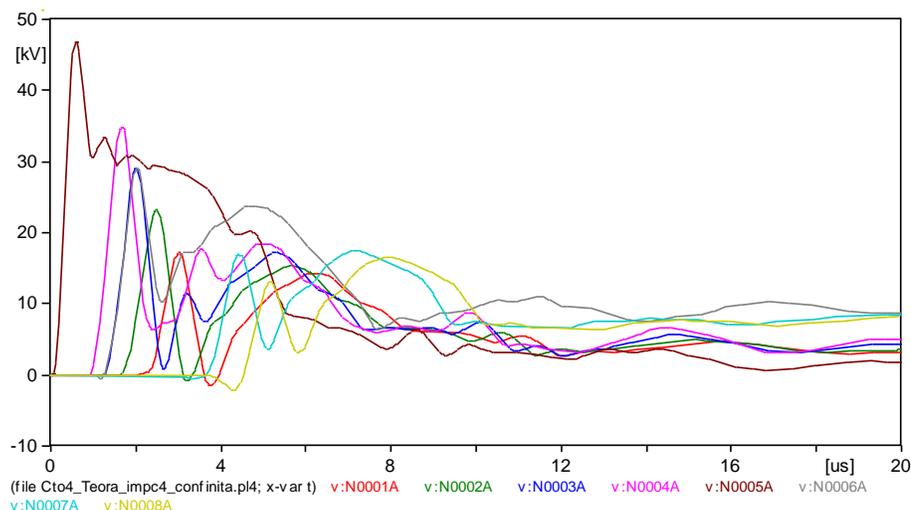
En la Figura 4-20 se observa las tensiones inducidas obtenidas para terreno no-plano transcurridos 6  $\mu$ s.



**Figura 4-20** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 1

En la Figura 4-20 se puede ver a simple vista como la onda de tensión en el nodo 5 y en el nodo 7, se recorta por efecto del descargador.

En la Figura 4-21 se muestra la respuesta de tensiones inducidas del tramo del circuito Consal - Teora (San Calixto) asumiendo terreno plano.



**Figura 4-21** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 1

Los valores máximos de tensiones inducidas para el impacto 1 se resumen en la Tabla 4-7. Se presenta además la relación entre los resultados obtenidos del capítulo 3 y 4.

**Tabla 4-7:** Tensiones inducidas tramo Consal - Teora (San Calixto) con elementos. Impacto 1

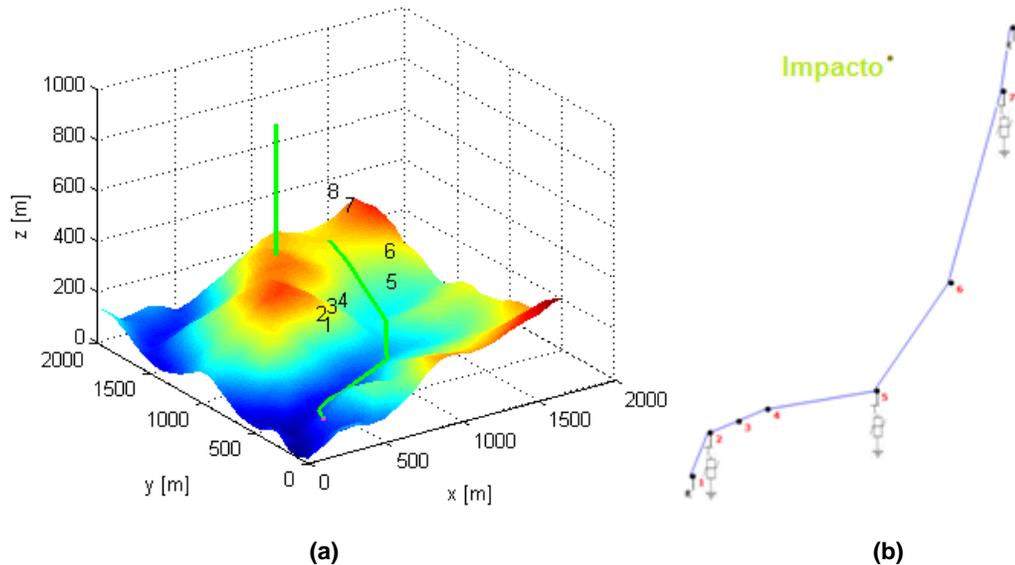
Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No- Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	-	-	17.14	49.68	-	-	0.35
2	-	-	23.21	55.73	-	-	0.42
3	-	-	28.99	58.12	-	-	0.50
4	-34.27	42.75	34.84	61.45	1.02	0.80	0.57
5	32.79	166.30	46.86	84.49	1.43	0.20	0.55
6	73.52	113.10	29.03	64.18	0.39	0.65	0.45
7	29.83	95.65	17.50	56.08	0.59	0.31	0.31
8	-	-	16.59	50.93	-	-	0.33

Al igual que en el caso sin elementos no fue posible obtener respuesta en todos los nodos para terreno no-plano. El análisis se basará en las respuestas obtenidas. Al

comparar los resultados entre terreno plano y no-plano, el único nodo que presenta una tensión mayor en terreno plano es el 5. La relación entre las tensiones con elementos y sin elementos, para los dos tipos de terreno, muestra una clara disminución en el caso con elementos. Esto se debe principalmente a los descargadores de sobretensión cuyo efecto se observa en general en todos los nodos del tramo. En el nodo 5 el efecto del descargador es mayor en terreno no-plano (80%) que en terreno plano (45%), razón por la cual la relación entre plano y no-plano para el caso con el elementos resulta mayor a 1. Para el nodo 7 la disminución en la tensión ocurre en la misma proporción, es decir que el efecto es el mismo.

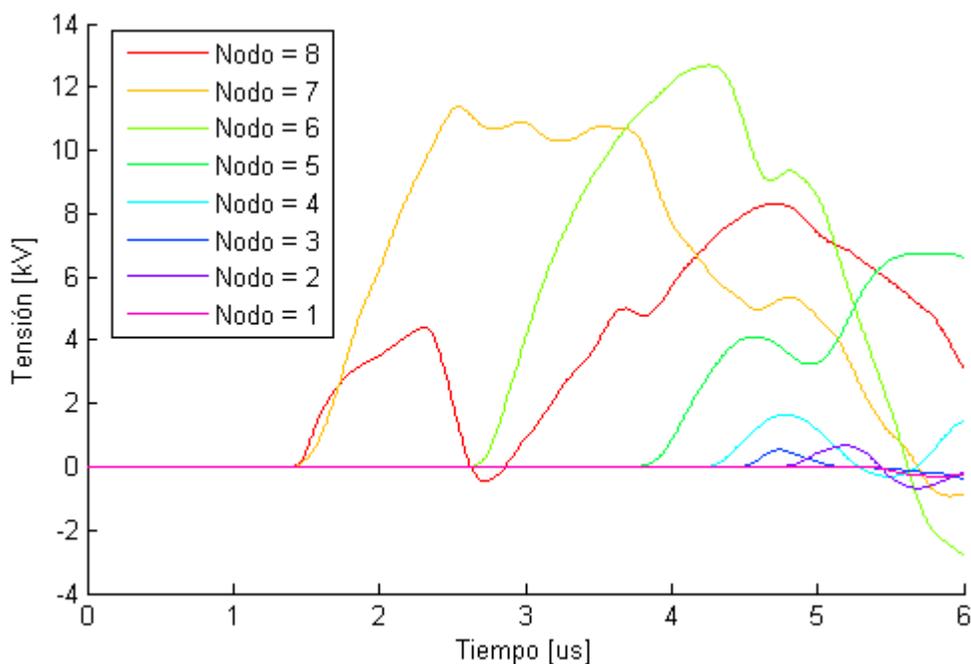
### 4.1.3.2 Impacto 2

En la Figura 4-22 se muestra el segundo caso de impacto del tramo Consal - Teora sobre la topografía real del municipio de San Calixto para terreno no-plano (a) y sobre terreno plano (b). El impacto ocurre en el pico de la montaña que está al norte del tramo. La altura del terreno en este punto es 275 m.



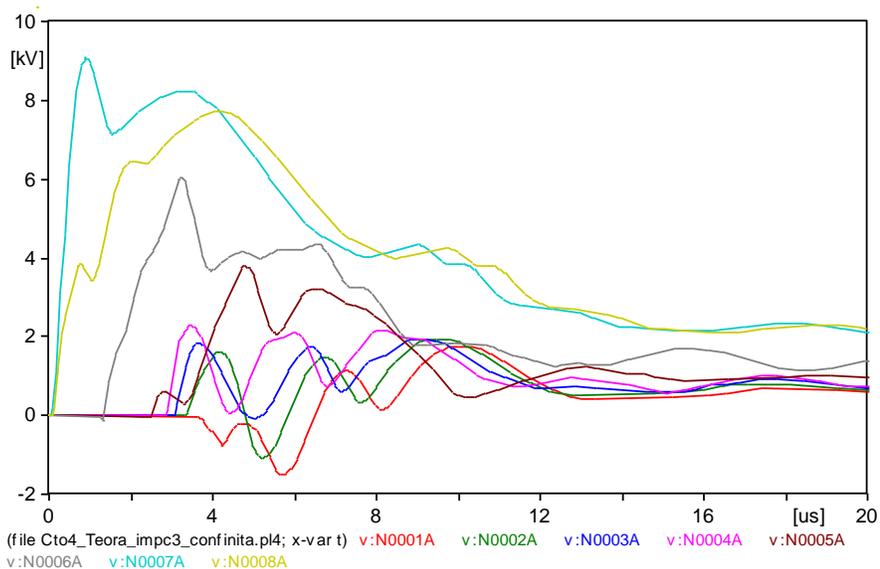
**Figura 4-22** Configuración terreno no-plano (a) y plano (b). Tramo Consal - Teora (San Calixto). Impacto 2

En la Figura 4-23 se muestra la respuesta de tensiones inducidas que se obtuvieron en los nodos en el tramo para terreno no-plano.



**Figura 4-23** Tensiones inducidas terreno no-plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 3

Claramente puede verse el efecto del descargador de sobretensiones sobre la onda de tensión del nodo 7. En la Figura 4-24 se muestra la respuesta de tensiones inducidas en los nodos del tramo del circuito Consal - Teora (San Calixto) para terreno plano.



**Figura 4-24** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 3

Los valores de tensiones inducidas máximas para el circuito Consal - Teora (San Calixto) sobre terreno plano y no plano se resumen en la Tabla 4-8.

**Tabla 4-8:** Tensiones inducidas terreno plano. Tramo Consal - Teora con elementos. Impacto 2

Nodo	Tensión inducida [kV] Terreno No-plano		Tensión inducida [kV] Terreno Plano		Plano / No- Plano (Elementos)	Elementos / Sin elementos (No-plano)	Elementos / Sin elementos (Plano)
	Elementos	Sin Elementos	Elementos	Sin Elementos	Tensión	Tensión	Tensión
1	-	-	1.75	2.63	-	-	0.67
2	-	0.91	1.95	3.05	-	-	0.64
3	-	0.54	1.92	3.33	-	-	0.58
4	-	1.65	2.27	3.66	-	-	0.62
5	6.76	6.64	3.78	5.30	0.56	1.02	0.71
6	12.68	13.68	6.03	7.05	0.48	0.93	0.86
7	11.37	14.72	9.07	10.07	0.80	0.77	0.90
8	8.32	10.11	7.71	7.62	0.93	0.82	1.01

En los resultados presentados en la Tabla 4-8 se observa que las tensiones en terreno no-plano son mayores que las obtenidas para terreno plano al considerar los transformadores y descargadores en los nodos 2, 5 y 7. Al analizar el caso de terreno no-plano, se observa que la relación permanece invariante en el nodo 5 mientras en el nodo 7 la tensión inducida disminuye. Esto puede explicarse por el hecho que el nodo 5 está a 1109 m del punto de impacto, mientras el nodo 7 es el nodo en el cual se observa la mayor disminución de la tensión inducida para terreno no-plano (23%) está a 397 m. Por la lejanía del impacto al nodo 5 el descargador no tiene ningún efecto y se observa un pequeño incremento por cuenta del transformador. Por otra parte para el caso de terreno plano es posible observar la disminución de las tensiones inducidas en todos los nodos al incluir los descargadores de sobretensión. En este caso en particular a pesar de ser un impacto alejado de la línea se obtuvo tensiones mayores para terreno no-plano pero debido a que el efecto de los descargadores fue mayor que para terreno plano.

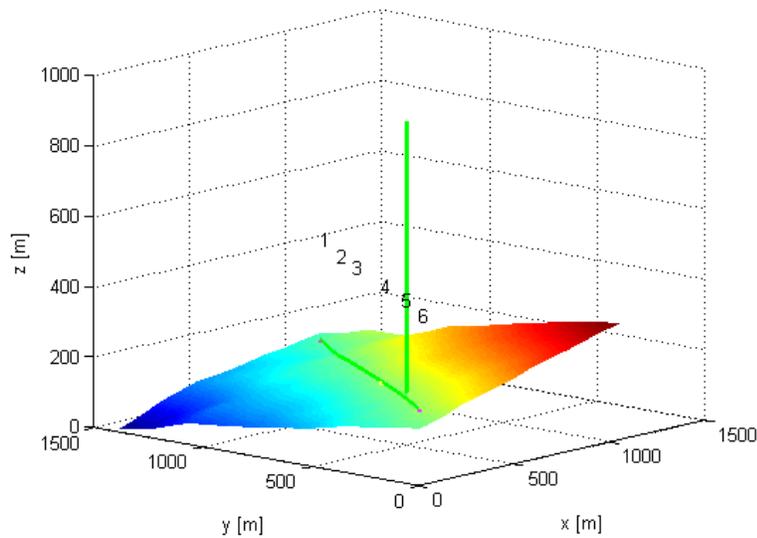
## 4.2 Impactos cercanos - Tramo El tarra

A continuación se analizará en mayor detalle el tramo del circuito de El Tarra para terreno no-plano que recrea escenarios reales. Con esto se busca profundizar en el análisis de

los resultados de sobretensiones, tensiones de disrupción y falla de transformadores, relación de la distancia y la altura entre el impacto y los nodos, y el efecto de los descargadores de sobretensión. Para las simulaciones que se presentan a continuación se mantienen las condiciones de simulación descritas al inicio del capítulo.

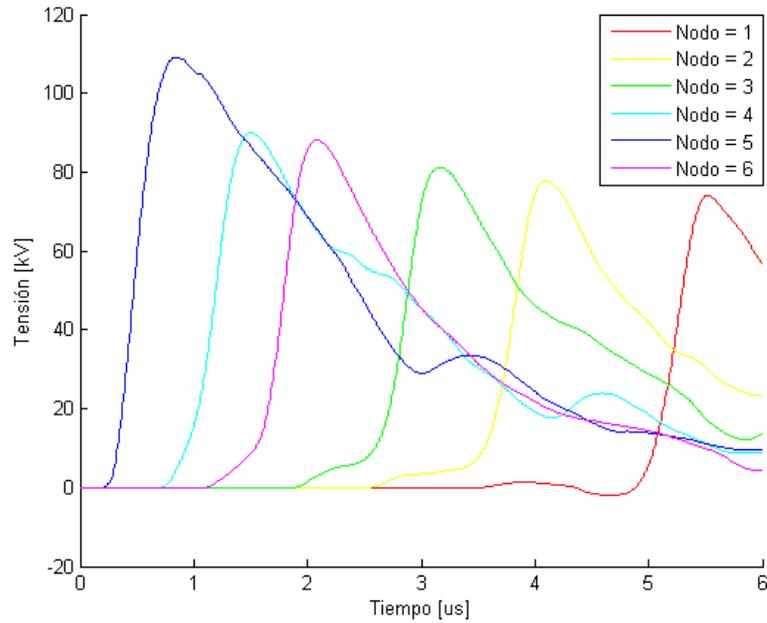
### 4.2.1 Impacto 4

En la Figura 4-25 se muestra el tramo del circuito El Tarra para terreno no-plano. El rayo impacta sobre el terreno a 48 m al oriente y 23 m al norte del nodo 5. La descarga de rayo que se indica con la línea vertical de color verde. Es un impacto muy cercano al tramo a una altura de 166 m.



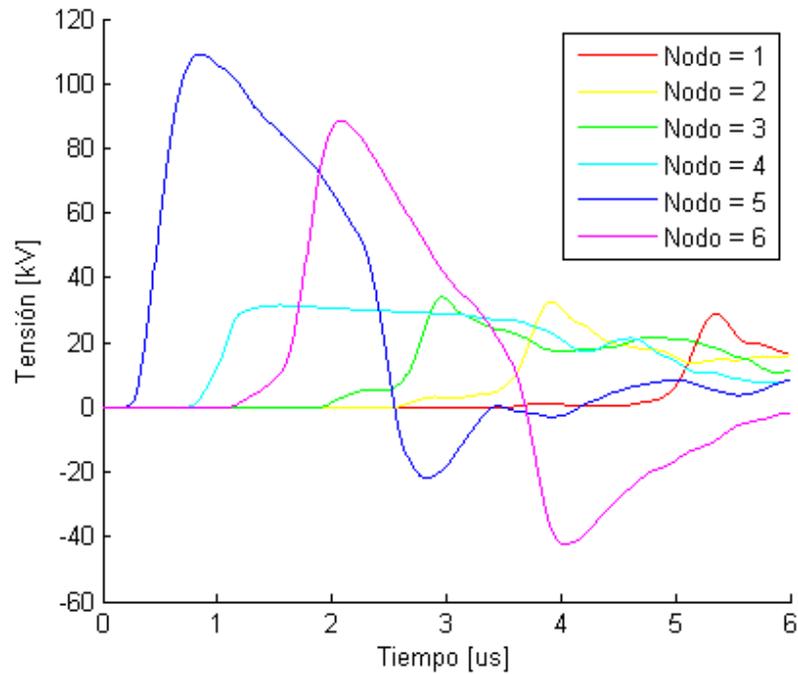
**Figura 4-25** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 4

En la Figura 4-26 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenida en los nodos del tramo para un tiempo de simulación de 6  $\mu$ s en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito.



**Figura 4-26** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 4

En la Figura 4-27 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



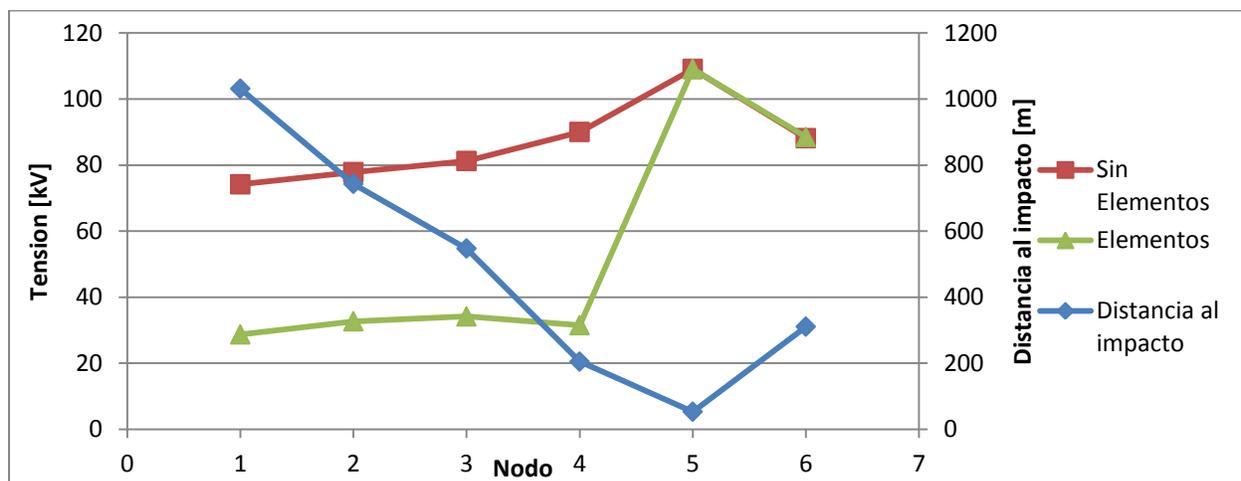
**Figura 4-27** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 4

La Tabla 4-9 resume las tensiones inducidas máximas al despreciar y considerar el transformador y el descargador en el nodo 4. Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-9:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 4

I4	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
			Elementos	Sin Elementos	
Nodo	Diferencia altura	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos	Tensión
1	-10.8	1031.3	28.73	74.16	0.39
2	-5.8	743.3	32.69	77.86	0.42
3	-0.8	547.4	34.17	81.22	0.42
4	0.2	204.8	31.51	90.02	0.35
5	4.2	53.3	109.10	109.10	1.00
6	9.2	310.8	88.51	88.14	1.00

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.



**Figura 4-28** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 4

Al analizar los resultados de la tabla y la Figura 4-28 es posible observar que para el caso sin elementos, en la medida que el nodo está más cerca del punto de impacto, la

sobretensión es más alta. Son los nodos 1 y 2 los más alejados, 1031 m y 743 m, con las tensiones inducidas más bajas, 74.16 kV y 77.86 kV respectivamente. La tensión nominal del transformador es 13.2 kV que de acuerdo a la especificación E-MT -0009 de Codensa [63] tomada como referencia para el análisis, la tensión nominal de impulso es 95 kV. De acuerdo a esto, la tensión inducida en el nodo 4 no superó esta tensión de impulso, con lo cual se espera no falle el transformador. La tensión inducida más alta se presenta en el nodo 5 que está a 53 m del impacto, siendo igual a 109.1 kV. El impacto ocurre entre los nodos 4 y 5, más cerca del 5. Se observa claramente el efecto del descargador del nodo 4 que limita la tensión inducida en este y por consiguiente en los otros nodos que se encuentran hacia el norte (1, 2 y 3). Los nodos 5 y 6 que están al sur del impacto no experimentan el efecto. En promedio entre los nodos 1 y 4, la tensión inducida se reduce un 61% al incluir el descargador.

### 4.2.2 Impacto 5

En la Figura 4-29 se muestra el tramo del circuito para el quinto impacto. La descarga impacta el terreno a 46 m al occidente y 33 m al sur del nodo 3. El canal de rayo se indica con la línea vertical de color verde. Es un impacto muy cercano al tramo, en especial al nodo 3 que está a 59 m del punto de impacto. Se espera que las tensiones inducidas aumenten significativamente. El impacto ocurre a una altura de 150 m sobre el terreno.

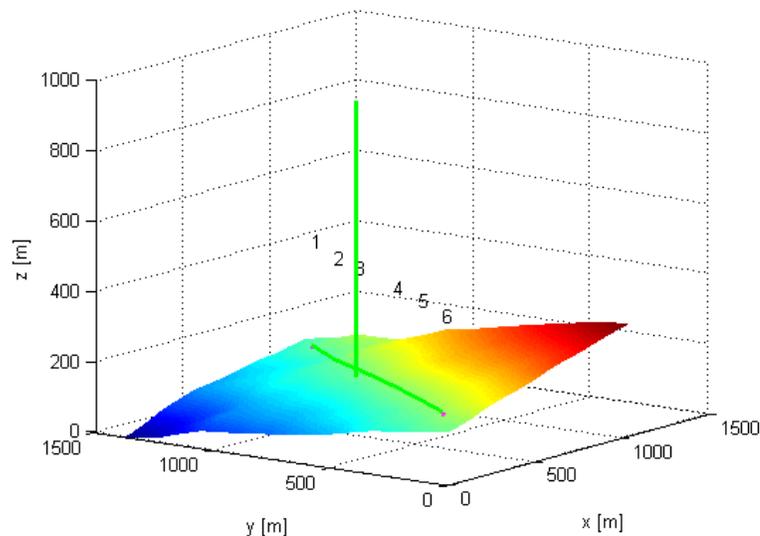
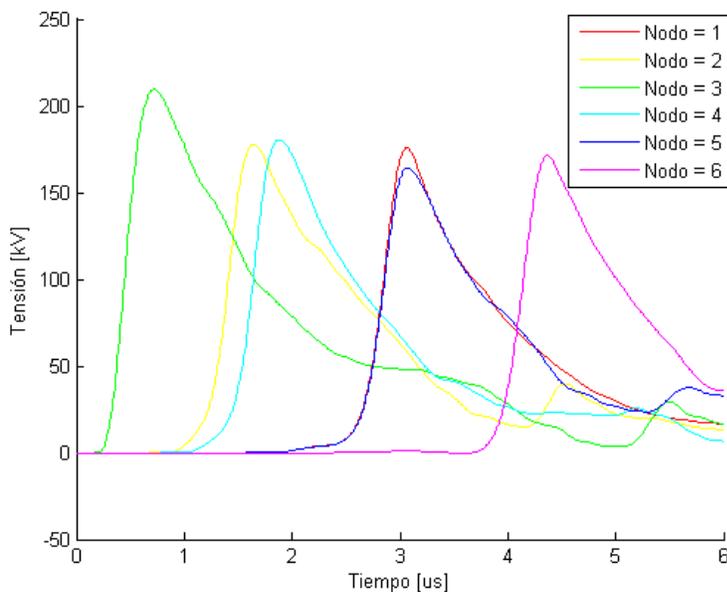


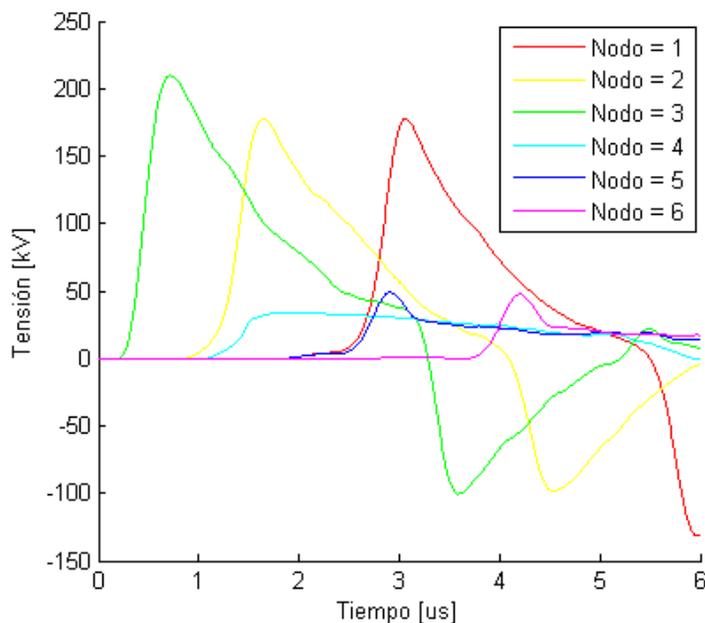
Figura 4-29 Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 5

En la Figura 4-30 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito. El tiempo de simulación es 6  $\mu$ s.



**Figura 4-30** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 5

En la Figura 4-31 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



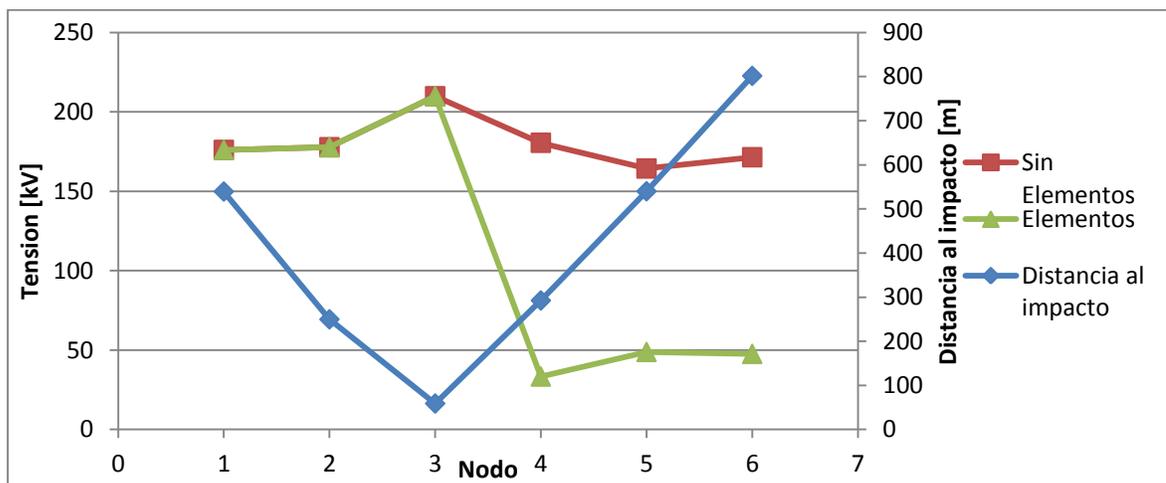
**Figura 4-31** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 5

La Tabla 4-10 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin elementos y considerando el transformador y el descargador en el nodo 4. Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-10:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 5

Nodo	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Diferencia altura - impacto	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos	Tensión
1	4.6	539.3	176.0	176.0	1.00
2	9.6	249.6	177.7	177.7	1.00
3	14.6	58.8	209.8	209.8	1.00
4	15.6	292.2	33.3	180.5	0.18
5	19.6	539.9	48.8	164.3	0.30
6	24.6	801.5	47.6	171.4	0.28

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.



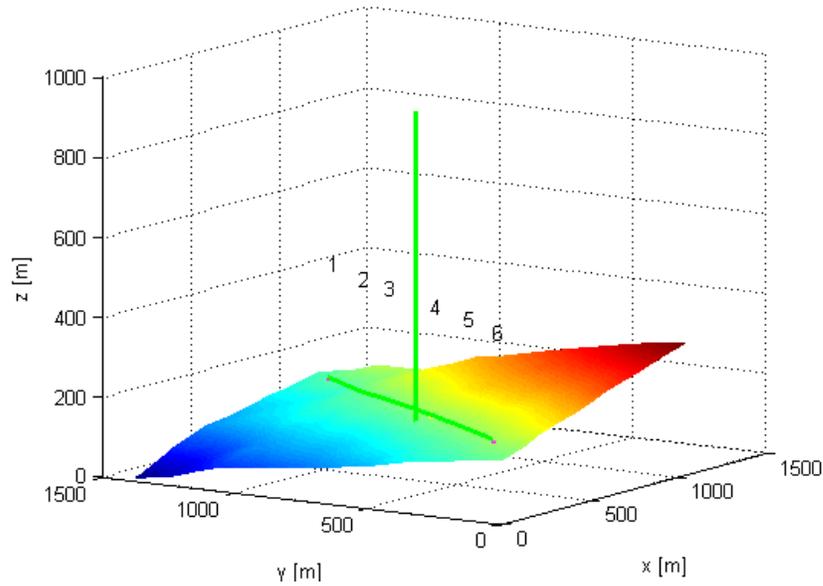
**Figura 4-32** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 5

De los resultados obtenidos se tiene que para el caso sin elementos, las tensiones inducidas en los nodos presentaron valores entre 164.3 kV para el nodo 5 y 209.80 kV

para el nodo 3, siendo éste último el más cercano al impacto. De acuerdo con la gráfica, los nodos que están a una distancia similar al punto de impacto como el 1 y el 5, difieren en la tensión inducida en los nodos, siendo 176 kV para el primero y 164.3 kV para el nodo 5. Al analizar la altura se tiene que el primer nodo está a una altura menor que el 5, ambos a una altura superior que el impacto. En este caso se podría inferir un posible efecto de la diferencia de altura en terreno entre el impacto y los nodos, presentándose una mayor tensión para una diferencia de altura menor. La tensión nominal del transformador es 13.2 kV. De acuerdo a la especificación E-MT -0009 de Codensa [63] tomada como referencia para el análisis, la tensión nominal de impulso es hasta 95 kV. De acuerdo a esto, la tensión inducida en el nodo 4 superaría el nivel básico de aislamiento ocasionando falla en el transformador. Ahora bien, al analizar los resultados en el cual se considera el descargador de sobretensiones en el nodo 4, se observa el efecto del elemento. El impacto ocurre entre el tercer y cuarto nodo, la onda al viajar por la línea y llegar al nodo 4 se limita por efecto del elemento, y por consiguiente la tensión inducida en los nodos 4, 5 y 6 se reduce (82%, 70 % y 72% respectivamente). En el nodo 4 pasa de 180.5 kV a 33.33 kV con lo cual se concluye que al incluir el descargador se evitaría la falla del transformador. Los nodos 1, 2 y 3 que están al norte del impacto presentan la misma tensión inducida que en el primer caso.

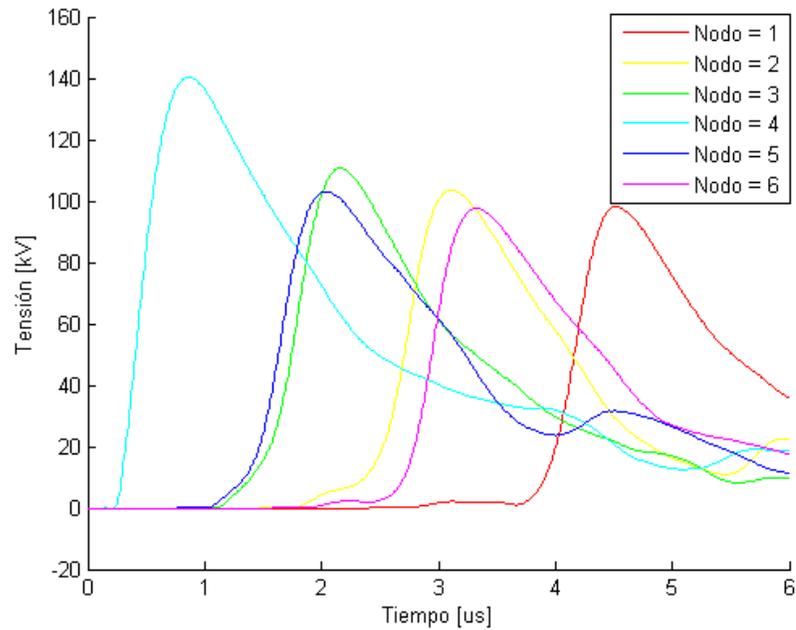
### 4.2.3 Impacto 6

En la Figura 4-33 se muestra el tramo del circuito para el sexto impacto. La descarga impacta el terreno 14 m al occidente y 48 m al norte del nodo 4. El canal de rayo se indica con la línea vertical de color verde. Es un impacto muy cercano a la línea que ocurre entre en nodo 3 y 4 a tan solo 50 m del nodo 4. Al igual que en el caso anterior se esperan valores de tensiones inducidas altas. El impacto ocurre a una altura de 151 m sobre el terreno.



**Figura 4-33** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 6

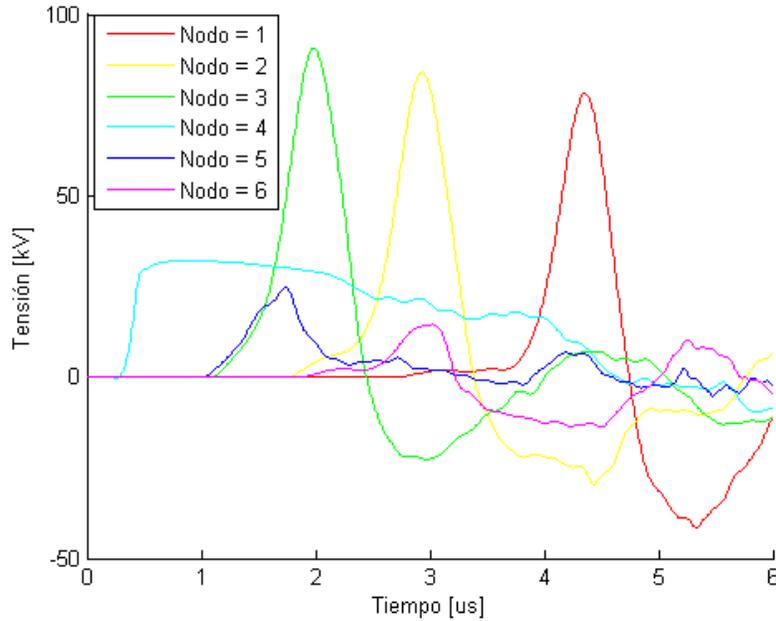
En la Figura 4-34 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito. El tiempo de simulación es 6  $\mu$ s.



**Figura 4-34** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 6

En la Figura 4-35 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el

transformador y descargador en el nodo 4. Se observa la limitación de las tensiones en los nodos 4, 5 y 6 principalmente.



**Figura 4-35** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 6

La Tabla 4-11 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin elementos y considerando el transformador y el descargador en el nodo 4. Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-11:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 6

Nodo	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Diferencia altura - impacto	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos	Tensión
1	4.1	797.3	78.26	98.08	0.80
2	9.1	507.5	84.04	103.40	0.81
3	14.1	312.6	90.75	110.70	0.82
4	15.1	50.0	32.14	140.50	0.23
5	19.1	283.9	24.64	103.00	0.24
6	24.1	543.8	14.49	97.57	0.15

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.

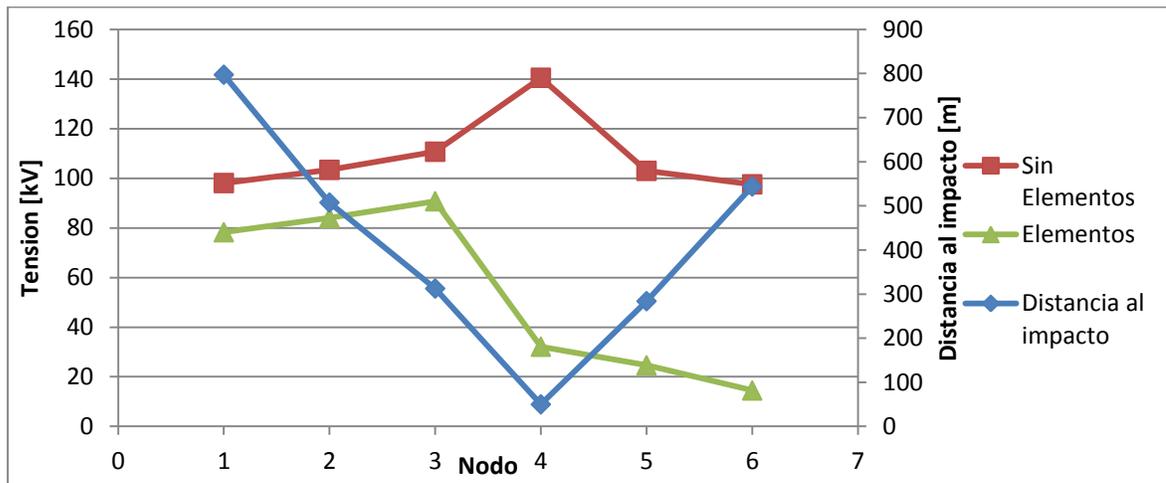


Figura 4-36 Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 6

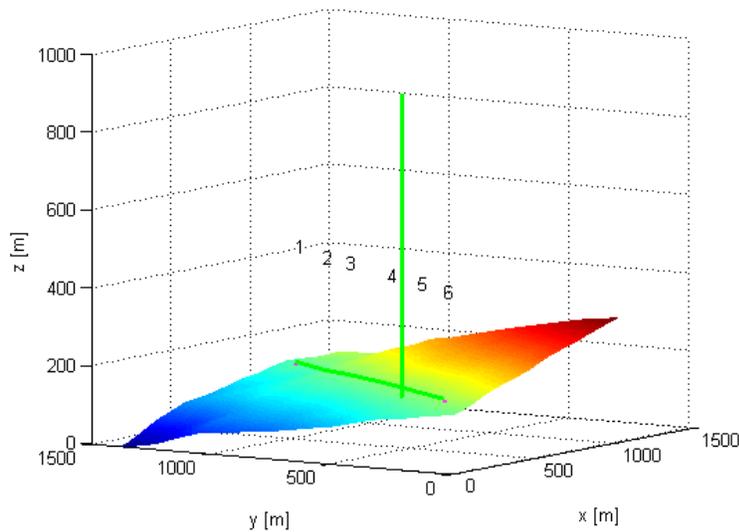
De los resultados obtenidos se tiene que para el caso sin elementos, las tensiones inducidas en los nodos presentaron valores entre 97.57 kV para el nodo 6 y 140.5 kV para el nodo 4, siendo éste último nodo el más cercano al impacto. De acuerdo con la gráfica, se evidencia una relación entre la distancia de los nodos al impacto y la tensión inducida. En la medida que el nodo está más cerca al impacto, la tensión inducida aumenta. En los nodos 2 y 5 se observa una característica particular. La tensión inducida obtenida es muy similar, 103.4 kV y 103 kV respectivamente, sin embargo el nodo 2 está a 507.5 m mientras el nodo 5 está a 284 m del impacto. Al analizar la altura se tiene que la diferencia de altura de terreno entre los nodos y el terreno donde ocurre el impacto, es menor para el nodo 2 (4.1 m para el nodo 2 y 19.1 m para el nodo 5). Lo anterior indicaría que la menor diferencia de altura entre el nodo y el impacto genera una tensión inducida mayor. Todas las tensiones en los nodos superaron la tensión nominal de impulso de 95 kV. Lo anterior indicaría falla en el transformador.

Al analizar los resultados en el cual se considera el descargador en el nodo 4, tal y como se observa en la Figura 4-36 y a diferencia de los casos anteriores, el efecto del descargador está presente en todos los nodos. En este caso el impacto ocurre muy cerca al nodo 4 (a 50 m), la tensión inducida en los nodos 1, 2 y 3 que están ubicados al norte del impacto, se reduce en promedio un 20% y para los nodos 4, 5 y 6, que están al sur del impacto, se reduce 77%, 76% y 85% respectivamente. Al incluir el descargador todas las tensiones de los nodos están por debajo de 95 kV, y en particular el nodo 4 donde se

ubica el transformador, presenta una tensión inducida de 32 kV. Se infiere entonces que con el elemento protector, el transformador no fallaría.

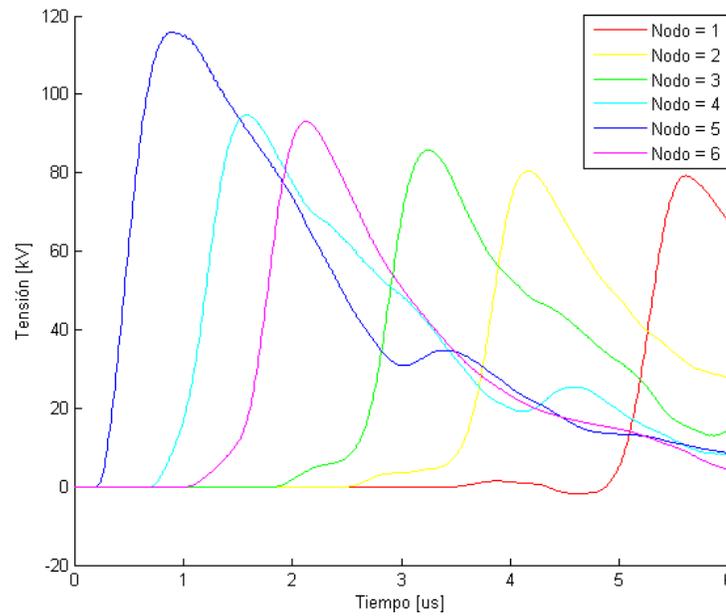
#### 4.2.4 Impacto 7

En la Figura 4-37 se muestra el tramo del circuito para el séptimo impacto. El rayo impacta el terreno a 12 m al occidente y 58 m al norte del nodo 5. El canal de la descarga se indica con la línea vertical verde. Es un impacto muy cercano a la línea, en particular del nodo 5 que está a 62 m del punto de impacto. Se espera que las tensiones inducidas aumenten significativamente. El impacto ocurre a una altura de 150 m sobre el terreno.



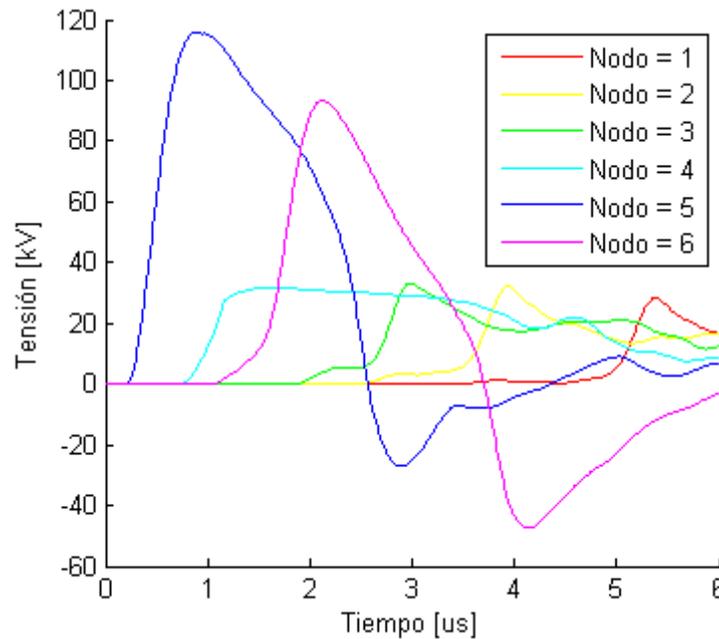
**Figura 4-37** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 7

En la Figura 4-38 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos.



**Figura 4-38** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 7

En la Figura 4-39 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



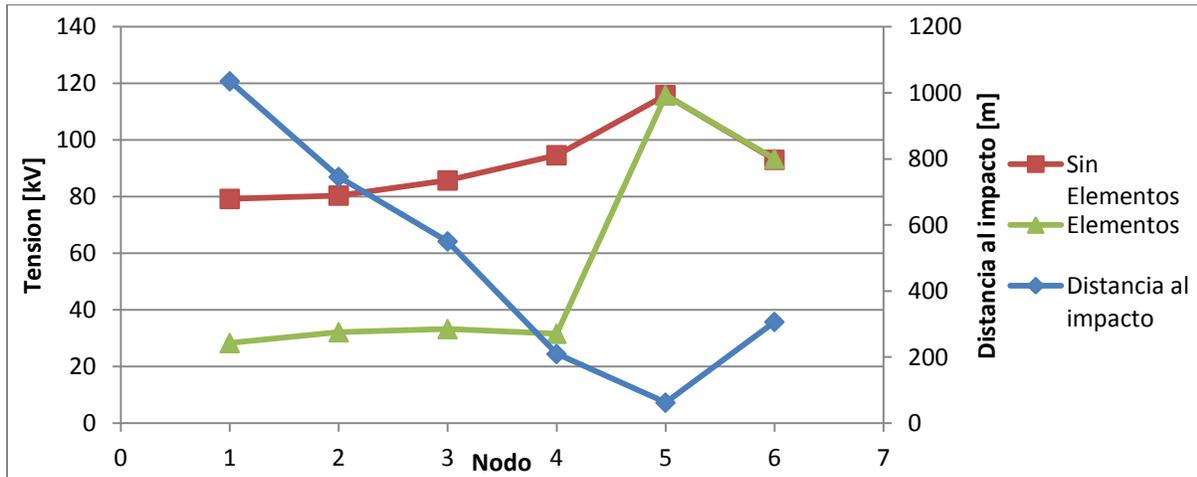
**Figura 4-39** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 7

La Tabla 4-12 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin elementos y considerando el transformador y el descargador en el nodo 4, para el impacto 7. Además se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-12:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 7

I7	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Nodo	Diferencia altura	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos
1	3.2	1035.5	28.34	79.24	0.36
2	8.2	745.9	32.16	80.42	0.40
3	13.2	550.6	33.28	85.75	0.39
4	14.2	209.7	31.60	94.67	0.33
5	18.2	62.4	115.90	115.90	1.00
6	23.2	306.7	93.44	93.06	1.00

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.



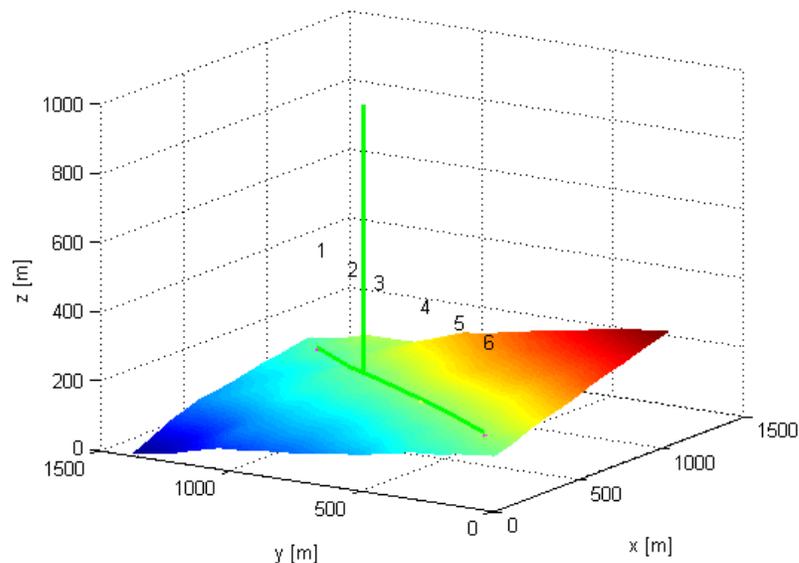
**Figura 4-40** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 7

De la simulación realizada para el caso sin elementos se obtiene que la mayor tensión se presentó en el nodo 5 (115.9 kV), siendo el nodo más cercano al impacto. Consecuentemente la menor tensión inducida se presenta en el nodo 1 que es el más

alejado al impacto. Esta relación entre la tensión inducida y la distancia del nodo al punto de impacto se observa en la Figura 4-40. Las tensiones inducidas en los nodos 4 y 6 están muy cerca a la tensión nominal de impulso de transformador (95 kV) [63], lo cual podría considerarse como falla para el caso del nodo 4. Ahora bien, para el caso con elementos, en la figura se observa que dado que el impacto ocurre entre el nodo 4 y 5, cercano al nodo 5, son en los nodos 1 a 4 donde se evidencia el efecto del descargador. Al impactar el rayo se induce la sobretensión que viaja en ambas direcciones de la línea, sin embargo en el nodo 4 al existir elemento protector, limita la tensión inducida en el nodo y por consiguiente la de los nodos siguientes a los cuales viaja la tensión (1, 2 y 3). En estos nodos la tensión inducida se redujo en promedio 63%. En particular en el nodo 4 la sobretensión pasó de 94.7 kV a 31.6 kV (67% reducción), con lo permite inferir que el transformador estaría protegido y no experimentaría fallas por aislamiento eléctrico. Ahora bien, los nodos 5 y 6 que están al sur del impacto no presentan cambio en la tensión inducida.

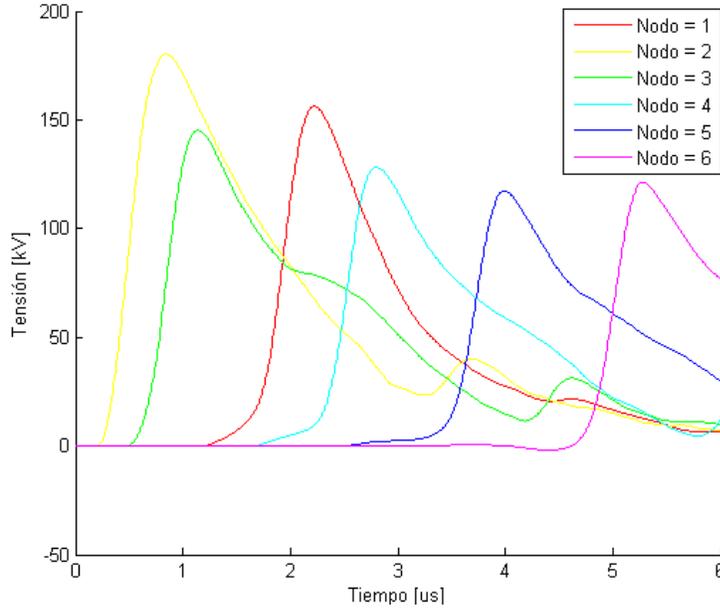
### 4.2.5 Impacto 8

En la Figura 4-41 se muestra el tramo del circuito para el impacto 8. La descarga impacta el terreno a 8 m al occidente y 61 m al sur del nodo 2. Es un impacto muy cercano al tramo, a 62 m lineales del nodo 2. El canal de rayo se indica con la línea vertical de color verde. El impacto ocurre a una altura de 153.6 m sobre el terreno.



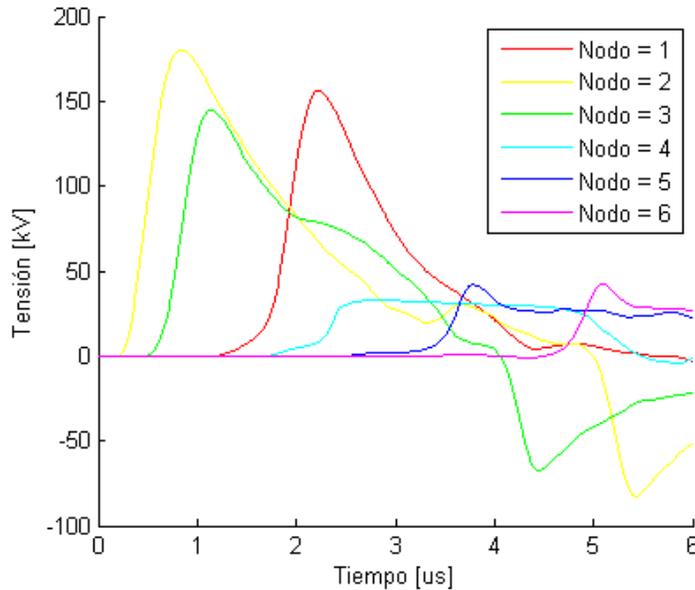
**Figura 4-41** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 8

En la Figura 4-42 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito. El tiempo de simulación es 6  $\mu$ s.



**Figura 4-42** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 8

En la Figura 4-43 se observan las ondas de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



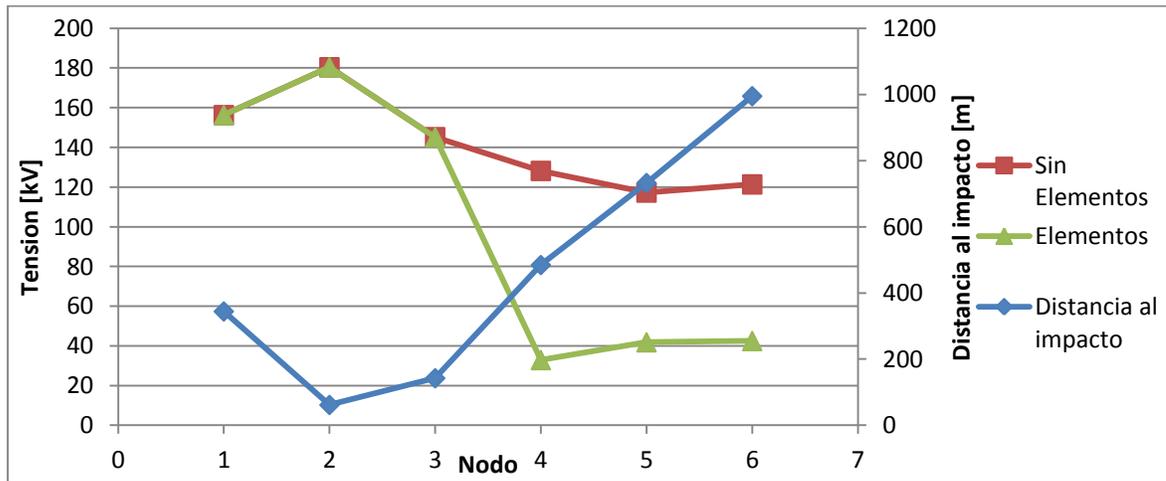
**Figura 4-43** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 8

La Tabla 4-13 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin elementos y considerando el transformador y el descargador en el nodo 4. Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-13:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 8

I8	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Nodo	Diferencia altura	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos
1	1.4	344.3	156.30	156.30	1.00
2	6.4	61.8	180.40	180.40	1.00
3	11.4	142.5	145.20	145.20	1.00
4	12.4	484.7	32.91	128.20	0.26
5	16.4	732.6	41.86	117.30	0.36
6	21.4	995.1	42.52	121.40	0.35

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.



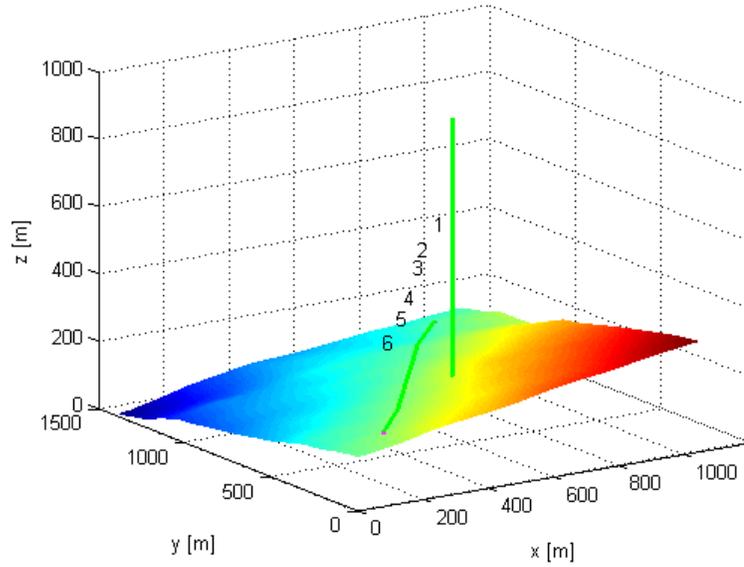
**Figura 4-44** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 8

Al observar los resultados obtenidos y la gráfica presentada, nuevamente puede observarse la relación existente entre las tensiones inducidas y la distancia de los nodos al punto de impacto. Los nodos 5 y 6 que son los más alejados al punto de impacto

presentan las menores tensiones inducidas. Por su parte el nodo 2 que es el más cercano al impacto presenta mayor tensión inducida (180.4 kV). Todos los nodos superaron la tensión nominal de impulso de 95 kV del transformador de 13.2 kV (especificación E-MT -0009 Codensa [63]). De acuerdo a esto, la tensión inducida en el nodo 4 superaría el nivel básico de aislamiento ocasionando falla en el transformador. Ahora bien, al analizar los resultados en el cual se considera el descargador de sobretensiones en el nodo 4, se observa el efecto del elemento para los nodos 4, 5 y 6 que están al sur del impacto que ocurre entre el segundo y tercer nodo. Cuando la onda viaja por la línea y llega al nodo 4 se limita por efecto del elemento, y por consiguiente la tensión inducida en los nodos 4, 5 y 6 se reduce (74%, 64 % y 65% respectivamente). La tensión inducida en el nodo 4 se redujo de 128 kV a 33 kV. Con este resultado es posible inferir que el descargador mitiga el posible daño del transformador y por consiguiente la falla del circuito. Los nodos 1, 2 y 3 que están al norte del impacto y del nodo con el efecto del descargador, no experimentan cambio alguno en el valor de la sobretensión.

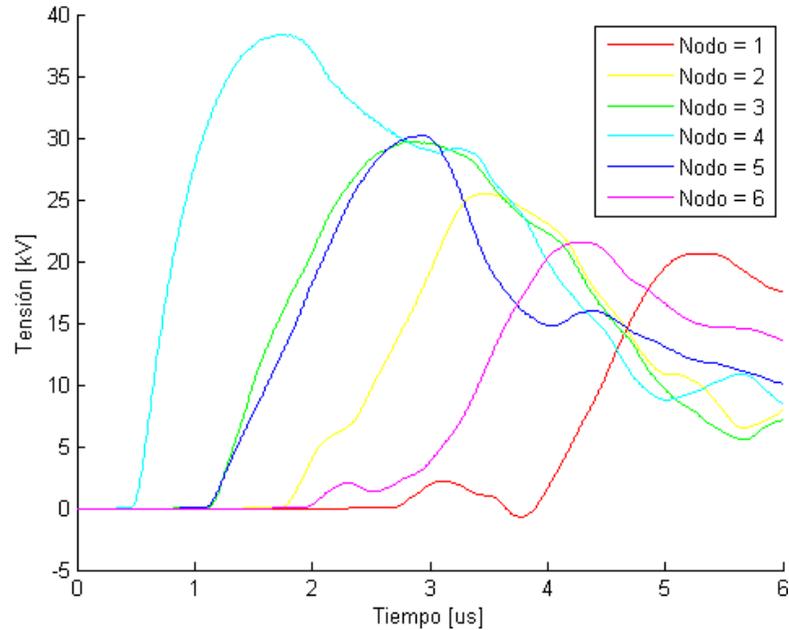
#### **4.2.6 Impacto 9**

En la Figura 4-45 se muestra el tramo del circuito para el noveno impacto. La descarga impacta el terreno a 131 m al oriente y 32 m al sur del nodo 4. El canal de rayo se indica con la línea vertical de color verde. El nodo 4 está a 137 m del impacto, es un impacto cercano al tramo. Se espera tensiones inducidas menores a las obtenidas a los impactos anteriores que eran muy cercanos (50 m - 60 m del tramo). El impacto ocurre a una altura de 187 m sobre el terreno.



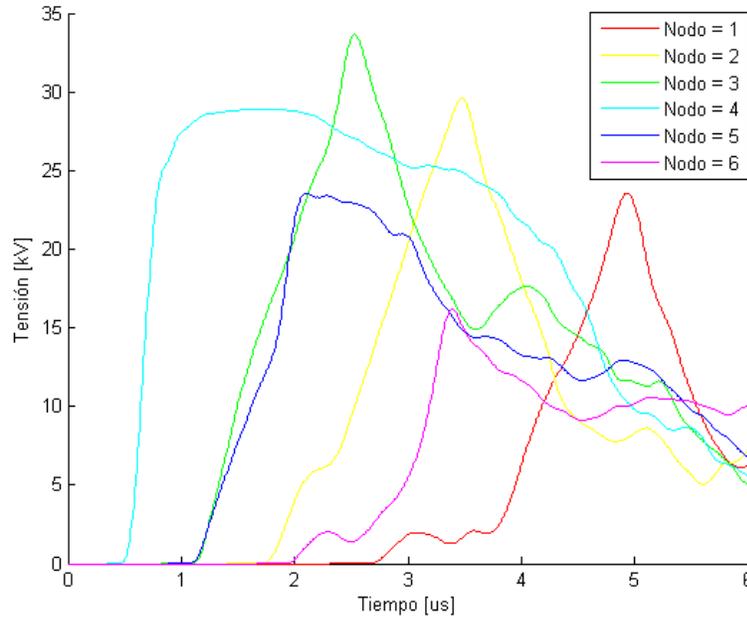
**Figura 4-45** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 9

En la Figura 4-46 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito para un tiempo de simulación de 6  $\mu$ s.



**Figura 4-46** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 9

En la Figura 4-47 se observa la respuesta de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



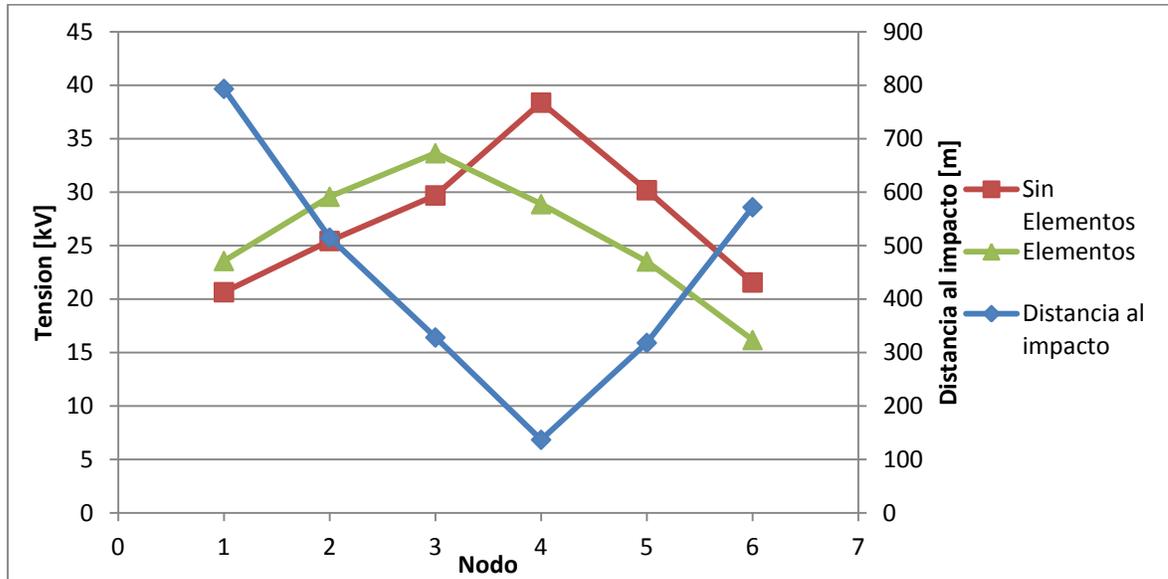
**Figura 4-47** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 9

La Tabla 4-14 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin y con elementos (transformador y descargador en nodo 4). Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-14:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 9

Nodo	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Diferencia altura - impacto	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos	Tensión
1	-32.2	793.2	23.56	20.64	1.14
2	-27.2	514.9	29.57	25.43	1.16
3	-22.2	328.2	33.64	29.69	1.13
4	-21.2	136.7	28.88	38.37	0.75
5	-17.2	318.0	23.51	30.18	0.78
6	-12.2	571.8	16.17	21.55	0.75

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.

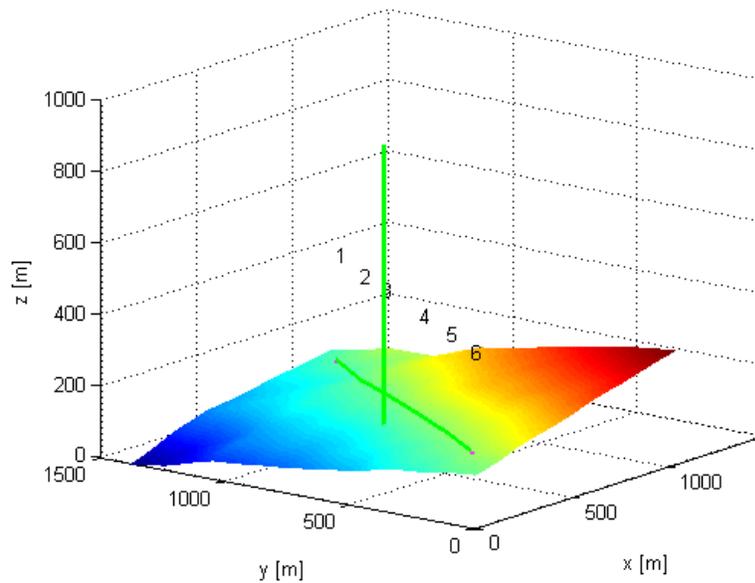


**Figura 4-48** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 9

De los resultados obtenidos se tiene que para el caso sin elementos, las tensiones inducidas en los nodos presentaron valores entre 39.5 kV para el nodo 1 que está más distante al impacto (776 m) y 65.2 kV para el nodo 4, que es el más cercano al impacto (125 m). Cabe notar la diferencia entre los valores de tensiones inducidas del impacto 9 con las obtenidas en los casos anteriores en los que se superaba la tensión de impulso de 95 kV del transformador. De acuerdo con la gráfica, se mantiene la relación entre la tensión inducida y la distancia a los nodos. Los nodos más distantes en su orden 1, 6 y 2, presentaron las menores tensiones inducidas. Por el contrario los nodos 4, 5 y 3 (137 m, 318 m y 328 m respectivamente) registraron las tensiones inducidas más altas. En la Figura 4-47 se observa el efecto del descargador para los nodos 4, 5 y 6, los dos últimos al sur del nodo 4 que es el que tiene el descargador. El impacto ocurre entre el nodo 3 y 4, la onda al viajar por la línea y llegar al nodo 4 se limita por efecto del elemento, y por consiguiente la tensión inducida en los nodos 4 siguientes al sur (5 y 6) se reduce (25%, 22 % y 25% respectivamente).

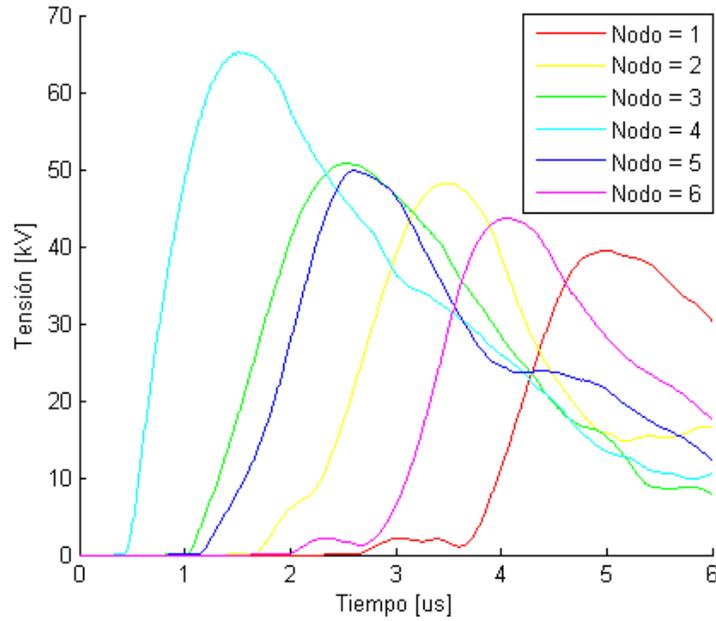
### 4.2.7 Impacto 10

En la Figura 4-49 se muestra el tramo del circuito para el noveno impacto. La descarga impacta el terreno a 54 m al occidente y 108 m al norte del nodo 4. El canal de rayo se indica con la línea vertical de color verde. El nodo 4 está a 125 m del impacto, es un impacto cercano al tramo. Se espera tensiones inducidas menores a las obtenidas a los impactos anteriores que eran muy cercanos (50 m - 60 m del tramo). El impacto ocurre a una altura de 135 m sobre el terreno, por debajo de la altura del tramo.



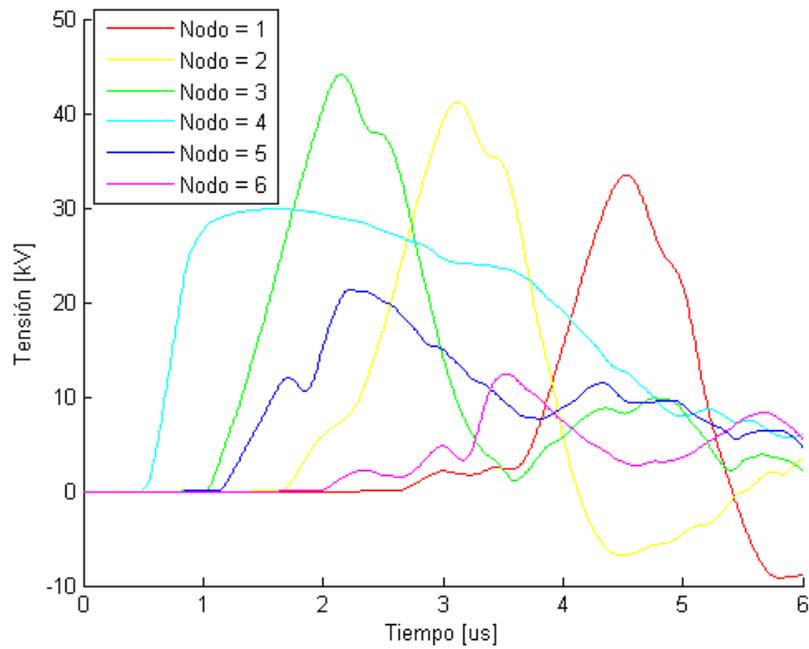
**Figura 4-49** Configuración terreno no-plano El Tarra. Impacto 10

En la Figura 4-50 se observa las ondas de tensiones inducidas obtenidas en los nodos del tramo en terreno no-plano para el caso sin elementos de circuito para un tiempo de simulación de 6  $\mu$ s.



**Figura 4-50** Respuesta terreno no-plano tramo El Tarra sin elementos. Impacto 10

En la Figura 4-51 se observa la respuesta de las tensiones inducidas obtenidas para cada nodo del tramo, transcurridos 6  $\mu$ s de simulación en terreno no-plano al incluir el transformador y descargador en el nodo 4.



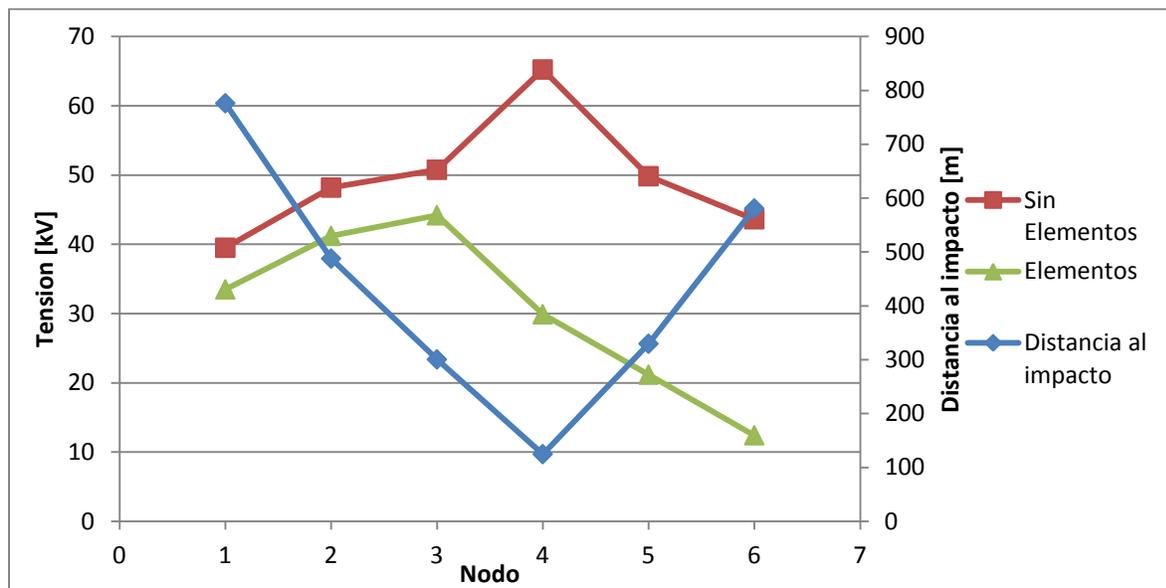
**Figura 4-51** Tensiones inducidas para terreno no-plano. Tramo El Tarra con elementos. Impacto 10

La Tabla 4-15 resume las tensiones inducidas máximas para los casos sin y con elementos (transformador y descargador en nodo 4). Se presenta la relación de las tensiones inducidas entre los dos casos.

**Tabla 4-15:** Tensiones inducidas tramo El Tarra. Impacto 10

Nodo	Geografía		Tensión inducida [kV] Terreno No Plano		Elementos/sin elementos (No-plano)
	Diferencia altura - impacto	Distancia al nodo	Elementos	Sin Elementos	Tensión
1	20	776.1	33.49	39.49	0.85
2	25	487.7	41.21	48.18	0.86
3	30	300.5	44.18	50.75	0.87
4	31	124.7	29.89	65.23	0.46
5	35	329.6	21.17	49.82	0.42
6	40	580.7	12.42	43.61	0.28

A continuación se muestra gráficamente los resultados a fin de observar la relación con la distancia entre los nodos y el punto de impacto así como el efecto del descargador.



**Figura 4-52** Tensiones inducidas - Distancia al impacto. Tramo El Tarra. Impacto 10

De los resultados obtenidos se tiene que para el caso sin elementos, las tensiones inducidas en los nodos presentaron valores entre 20.64 kV para el nodo 1 que está más distante al impacto a 793 m, y 38.37 kV para el nodo 4 que es el más cercano a la descarga a 137 m. De acuerdo con la gráfica, se mantiene la relación entre la tensión inducida y la distancia a los nodos. Los nodos más distantes en su orden 1, 6 y 2 (776 m, 581 m y 488 m respectivamente), presentaron las menores tensiones inducidas. Por el contrario los nodos 4, 3 y 5 (125 m, 300 m y 329 m respectivamente) registraron las tensiones inducidas más altas. En la Figura 4-51 se observa el efecto del descargador principalmente en los nodos 4, 5 y 6, los dos últimos al sur del nodo 4 que es el que tiene el descargador. El impacto ocurre entre el nodo 3 y 4, más cercano al nodo 4 que al tener el descargador limita la tensión inducida en sus nodos y los siguientes al sur del mismo, sin embargo similar al impacto 6 (y efecto contrario respecto al impacto 9), se observa también una pequeña reducción (15% en promedio) en los nodos 1, 2 y 3. En este punto cabe analizar que contrario al impacto anterior, éste último se da a una altura inferior a la del tramo. De acuerdo con estos resultados es posible afirmar que el efecto del terreno (topografía, altura, conductividad) es determinante en el resultado de las tensiones inducidas. La reducción en los nodos 4, 5 y 6 fue del 61% en promedio. En este caso, un impacto que ocurre a 125 m del nodo más cercano, los valores de tensiones inducidas no superaron la tensión de impulso de 95 kV del transformador, por lo cual no se esperaría falla.



# 5. Conclusiones y trabajos futuros

## 5.1 Conclusiones

Este trabajo final de maestría presenta los resultados de tensiones inducidas para líneas aéreas sobre terreno montañoso (no-plano) en comparación con las obtenidas cuando se asume terreno uniforme (plano), mostrando las diferencias encontradas en cada caso. De otra parte realiza un análisis sobre el efecto sobre las tensiones inducidas al incluir los elementos de circuito tales como transformadores y descargadores de sobretensión en líneas aéreas para las dos tipologías de terreno mencionadas. Se establece la relación existente entre las fallas presentadas en líneas aéreas y las sobretensiones inducidas por la caída de rayos, que presenta una relación directa con la actividad de tormenta, es decir, las fallas coinciden con la incidencia de rayos ocurridas en cada zona en particular.

### 5.1.1 Tensiones inducidas en redes aéreas

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, cuando se tiene una configuración de redes aéreas sobre terreno montañoso y los impactos ocurren cerca del circuito (distantes 50-60 m del nodo más cercano) y a una altura similar a la que se encuentra el tramo sobre el terreno o menor a 135 m entre el impacto y el nodo (esta fue la máxima diferencia de altura para la cual se obtuvo una relación menor a 1 entre las tensiones inducidas plano / no-plano), las tensiones inducidas sobre terreno no-plano son mayores en comparación con las obtenidas para el caso de terreno plano. Además, las tensiones inducidas aumentan en la medida que la descarga ocurre en la parte baja de una montaña o sobre el valle, comparadas con las obtenidas cuando ocurre encima de esta. En terreno no-plano se obtuvo tensiones inducidas de hasta 209.8 kV para un impacto que ocurre aproximadamente a 60 m del nodo y a una altura muy similar a la del tramo

(14.6 m de diferencia), mientras que cuando la descarga impacta sobre el pico de la montaña, 265 m más elevado que el poste, para el mismo nodo la tensión inducida apenas ronda los 6 kV.

En terreno no-plano para impactos cercanos a la línea, la topografía del terreno muestra cierta influencia en el valor máximo de la tensión inducida siendo mayor en la medida que el tramo se encuentre rodeado por montañas. Por otra parte, cuando se considera un impacto distante de la línea como por ejemplo sobre el pico de la montaña o al menos a una altura superior de 135 m con respecto a la altura de los nodos, las tensiones inducidas obtenidas para terreno plano son mayores en comparación con las obtenidas para terreno no-plano.

El factor determinante en el valor de la tensión inducida es la distancia entre el nodo y el impacto. En general los resultados mostraron que entre menor es esta distancia, mayor será la tensión inducida en el nodo. Esta relación se mantuvo como generalidad en las simulaciones y fue posible observarla en los perfiles de tensión contra distancia. En la medida que los nodos están más cerca al nodo, las tensiones inducidas son mayores.

De acuerdo con los resultados obtenidos no sería correcto asumir que para cualquier configuración las tensiones inducidas en terreno no-plano siempre serán mayores comparadas con las de terreno plano, pues depende en gran medida de la ubicación del impacto respecto a la línea y de la altura. En este trabajo se identificó que para impactos lejanos con diferencias de altura mayores a 135 m entre nodos e impacto, las tensiones inducidas tienden a ser más altas en terreno plano. Se ha visto principalmente que la diferencia de altura entre el impacto y la línea influye significativamente en el valor de la tensión inducida en los nodos, por tanto se recomienda considerar siempre la topografía del terreno de los tramos a simular, realizando para cada caso en particular una simulación detallada con full-wave analysis. Sin embargo, se aclara que es necesario profundizar más en la investigación con muestras más representativas de casos que permitan determinar con mayor propiedad una altura o diferencia de altura a partir de la cual se esperan tensiones inducidas mayores en terreno plano que en terreno no-plano. Las alturas y distancias aquí presentadas podrían tomarse como referencia para la selección de modelos de simulación de acuerdo a las condiciones y características del caso en particular que se quiera analizar.

### 5.1.2 Tensiones inducidas en redes aéreas incluyendo transformadores y descargadores de sobretensiones

En términos generales cuando se incluyen descargadores de sobretensión, la acción del elemento se traduce en una disminución de la tensión inducida en los nodos del circuito. Sin embargo, si el impacto ocurre sobre el pico de la montaña alejado de la línea, en terreno no-plano no se experimenta reducción alguna de la sobretensión por acción del descargador sino por el contrario ocurre un ligero incremento en la tensión inducida del nodo a causa del transformador. Por otra parte, para terreno plano, siempre está presente el efecto del descargador. Lo anterior permite concluir que al hacer aproximaciones de tensiones inducidas en montaña como si fuera terreno plano y se consideran los elementos, se está considerando una disminución adicional en la tensión máxima esperada que en la realidad podría no ocurrir. Ahora bien, en terreno no-plano para impactos cercanos al tramo, hacia la parte baja de la montaña o sobre el valle, el efecto del descargador es mucho mayor en aquellos nodos que tienen conectado el descargador de sobretensiones mientras que en terreno plano se observa un mayor efecto en los nodos vecinos que no cuentan con el elemento protector. Para impactos cercanos y a una diferencia de altura menor a 135 m respecto al nodo, el descargador reduce la tensión inducida entre 22% y 36% más en el nodo que tiene el elemento cuando se considera terreno no-plano. En general, para impactos cercanos, se observa un mayor efecto del descargador en todos los nodos del tramo en terreno plano, reduciendo en promedio 59% las tensiones inducidas contra un 54% en terreno no-plano.

Al realizar un análisis más detallado para impactos muy cercanos (50 m - 65 m) y cercanos (125 m - 135 m) al tramo, fue posible determinar la relación existente entre las descargas eléctricas atmosféricas y las fallas de transformadores. Para el caso específico del tramo de El Tarra, de diez impactos que se realizaron, anotando que la distancia entre el impacto y el nodo más cercano estuvo entre 50 y 634 m, en al menos cuatro se esperaría falla en el transformador al igualar o superar la tensión nominal de impulso de 95 kV para un transformador de distribución con tensión nominal 13.2 kV, es decir el 40% de los impactos simulados. Ahora bien, al considerar solo los impactos que ocurrieron a menos de 65 m del nodo más cercano del tramo (impactos 4, 5, 6, 7 y 8), la

tensión de impulso de 95 kV se superó en el 80% de los casos. De acuerdo a estos resultados podría afirmarse tentativamente que de cada 10 impactos que ocurran a menos de 65 m, por lo menos en 8 se presentaría falla en el transformador. Lo anterior siempre y cuando en el nodo no se haya instalado descargadores de sobretensión o presenten alguna falla en su funcionamiento pues de acuerdo a los resultados obtenidos, para todos los casos de impacto cercano al incluir el elemento protector, la tensión inducida en el nodo estuvo por debajo de 95 kV. Para estos impactos muy cercanos al tramo, en el caso de terreno no-plano se notó la disminución en promedio entre el 60% y 80% de la tensión inducida inicial.

De acuerdo con estos resultados se concluye también que para un correcto y aproximado cálculo de tensiones inducidas en líneas aéreas sobre terreno montañoso, es indispensable realizar simulaciones en software computacionales por código que permitan incluir principalmente la topografía del terreno y los elementos del circuito (full-wave analysis). Ya se ha visto que los resultados obtenidos para terreno plano difieren bastante con los obtenidos para terreno no-plano, por lo cual no sería correcto realizar estas aproximaciones. Modelos como el de Rusck podrían fallar por no considerar la topografía del terreno, la ubicación de la descarga respecto a la línea o la conductividad del terreno. Por otra parte, la presencia de transformadores de distribución con los respectivos descargadores de sobretensión, así como la presencia y otros elementos a lo largo de la línea, también deben tenerse en cuenta con el fin de predecir la respuesta más aproximada de las tensiones inducidas ante los campos electromagnéticos generados por la corriente de rayo. Si no se consideran estos elementos podrían obtenerse para impactos cercanos por ejemplo, valores de tensiones inducidas mayores a los que se presentarían en la realidad, lo que podrían significar sobrecostos cuando se realicen diseños de sistemas de apantallamiento o selecciones de protecciones.

Al igual que en otras aplicaciones de ingeniería, se hacen imprescindibles códigos desarrollados como los utilizados en este trabajo, pues en general se requiere la integración de muchos modelos y ecuaciones. En este caso particular, el programa yalukdraw utilizado en las simulaciones de terreno plano, considera un modelo de descarga de retorno de rayo y acople del campo del campo electromagnético que se asemeja en gran medida al fenómeno real como es el modelo de Agrawal, mientras para terreno no-plano el cálculo de campos electromagnéticos y tensiones inducidas, utiliza el método de

diferencias finitas en el dominio del tiempo FDTD-3D implementado por el co-director de este trabajo, mediante el modelo de conductor delgado TWM. Estas consideraciones para el cálculo de campos electromagnéticos y tensiones inducidas de acuerdo a la topografía así como la inclusión de elementos de circuito, requieren el desarrollo de códigos computacionales que permitan la inclusión de los diferentes modelos que permitan representar lo mejor posible, la configuración que se tiene en la realidad.

Finalmente el trabajo investigativo desarrollado ha permitido cumplir con los objetivos planteados. Se determinó la relación existente entre las fallas en las líneas mediante la caracterización de la actividad eléctrica atmosférica en terreno de montaña sobre las redes aéreas del operador de red de Norte de Santander, utilizando la red de localización de rayos LINET fundamental en la elaboración de los mapas de DDT y correlación de fallas con la incidencia de descargas, combinado además con la simulación computacional de los impactos de rayo cercanos a las líneas considerando tramos sobre diferentes topologías de terreno. Lo anterior permitió establecer la alta relación que existe entre las tensiones inducidas que se presentan cuando el rayo impacta cerca de las líneas y las fallas que experimentan los circuitos. Así mismo se logró determinar cómo cambian los valores de las sobretensiones al considerar la topografía del terreno y los elementos de circuito. Se validó la información y registros de la red LINET soportado en investigaciones reconocidas que demuestran la alta eficiencia de la red que la posiciona como la de mayor eficiencia en el país hasta la fecha. Por medio de este trabajo se quiso ir más allá en relación a lo propuesto inicialmente, al realizar la simulación y comparación de las tensiones inducidas por rayo sobre líneas aéreas en terreno plano y no-plano. Se resalta que en estas simulaciones se consideraron detalles a profundidad como el trazado de los circuitos sobre la topografía real de los municipios, la conductividad del terreno de acuerdo al tipo de suelo en la región, y la inclusión de transformadores y descargadores de sobretensiones del circuito. Estas consideraciones recrean en mayor proporción varias configuraciones de circuito de la vida real y resultan siendo fundamentales para el análisis y diseño de sistemas de protección contra rayos en configuraciones de circuito sobre terreno montañoso.

## 5.2 Trabajos futuros

Los resultados de este trabajo arrojaron conclusiones muy interesantes al determinar en detalle como difieren las tensiones inducidas en las líneas de distribución que recorren o atraviesan terrenos montañosos típicos en la geografía colombiana, respecto a la tradicional aproximación de terreno plano. Este trabajo servirá de referencia para la ingeniería colombiana y mundial en el mejoramiento de los diseños de protección contra rayos para este tipo de configuraciones sobre terreno de montaña. Además sirve como referencia para futuras tesis de maestría o doctorado que busquen determinar un valor exacto de distancia o diferencia de altura a partir del cual se esperen tensiones inducidas mayores en terreno plano que en terreno no-plano. Cabe resaltar que este tipo de simulaciones y con el nivel de detalle aquí alcanzado no se habían hecho antes, por lo que resulta imperativo la publicación de los resultados obtenidos.

Ahora bien, resulta interesante hacer un análisis de la confiabilidad en la red actual, para lo cual primero se debe calcular la tasa de fallas total que se calcula sumando las fallas por impacto directo e indirecto. La tasa de fallas por impacto directo depende únicamente de la tasa de colección de rayos sobre la estructura que depende de la altura, el ancho de la estructura, y la DDT. Por su parte la tasa de impactos indirectos se ve afectada por el número de eventos que causan flameo en la cadena de aisladores. Si bien, en los análisis presentados algunos eventos, especialmente los más cercanos pueden ser mayores para el caso de terreno no-plano, se debe hacer un análisis completo realizando un gran número de simulaciones de acuerdo a la metodología de MonteCarlo, y así se obtendría el número de impactos que causan flameo por impacto indirecto. Con base en los valores de  $\lambda_i$  (tasas de falla por impacto indirecto) obtenidos y los usuarios conectados a la red, se obtendrían los nuevos indicadores de Saifi, Saidi, Asai, entre otros. Este se constituye en un trabajo futuro. En el presente trabajo inicialmente se realizaron simulaciones considerando solo las líneas y posteriormente se incluyeron los elementos, sin embargo la línea se dejó invariante en cada caso, es decir, se mantuvieron siempre según correspondía sus elementos (transformadores y descargadores) y las variables de simulación (conductividad terreno, impedancia, altura de la línea), y se variaron los puntos de impacto para diferentes topografías. En un trabajo futuro podría considerarse realizar un análisis de cada una de las variables y los elementos considerados de forma independiente, con el fin de determinar el efecto

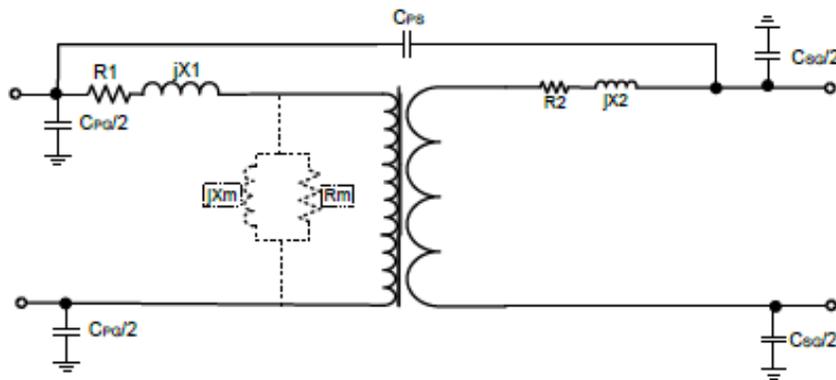
---

individual de cada una de las variables y/o elementos en la sobretensión inducida y en la tensión en cada nodo de los tramos de línea.



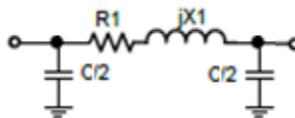
# A. Anexo: Modelos y ecuaciones de elementos

A continuación se muestra el modelo utilizado para representar un transformador típico de distribución:

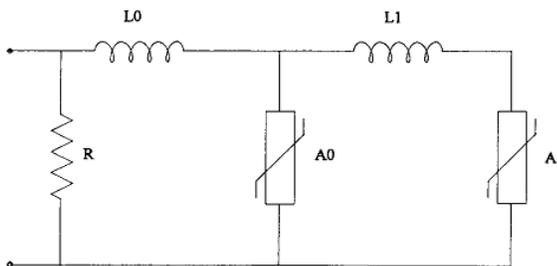


**Figura 5-1** Modelo del Transformador considerando efectos capacitivos para comportamientos transitorios de alta frecuencia

Para terreno plano se usó el modelo del transformador programado en Yaluk-Draw, con el fin de poder caracterizar un comportamiento típico en frecuencia para transformadores de distribución. A continuación se muestran los modelos de la línea y el descargador de sobretensiones.



**Figura 5-2** Modelo línea de distribución



**Figura 5-3** Modelo del descargador de sobretensiones

El comportamiento no-lineal de V-I para los elementos A0 y A1 está descrito en unidades normalizadas (p.u.) como se muestra en la Figura 5-4.

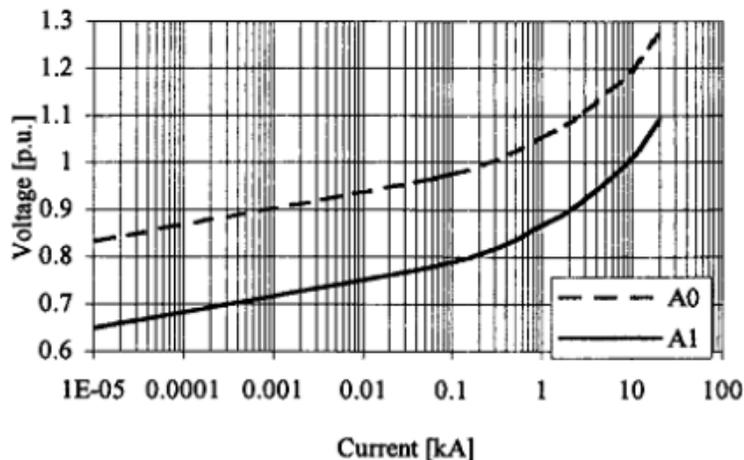


Figura 5-4 Características estáticas de los elementos no lineales del modelo del descargador de sobretensión

Para el caso de terreno no-plano el modelo de línea y resistor se incluyen directamente en el método FDTD. A continuación se muestran las ecuaciones incluidas en el código de simulación de para la implementación de los elementos en este tipo de configuración [64].

Fuente de Corriente

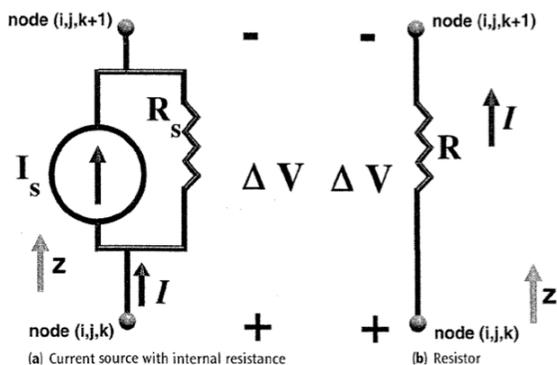


Figura 5-5 Fuente de corriente implementada en no-plano

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = C_{eze}(i, j, k) \times E_z^n(i, j, k) + C_{ezby}(i, j, k) \times \left( H_y^{n+1/2}(i, j, k) - H_y^{n+1/2}(i-1, j, k) \right) \\ + C_{ezbx}(i, j, k) \times \left( H_x^{n+1/2}(i, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j-1, k) \right) + C_{ezs}(i, j, k) \\ \times I_s^{n+1/2}(i, j, k)$$

donde:

$$C_{eze}(i, j, k) = \frac{2\varepsilon_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) - \frac{\Delta t \Delta z}{R_s \Delta x \Delta y}}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R_s \Delta x \Delta y}}$$

$$C_{ezby}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R_s \Delta x \Delta y} \right) \Delta x}$$

$$C_{ezbx}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R_s \Delta x \Delta y} \right) \Delta y}$$

$$C_{ezs}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R_s \Delta x \Delta y} \right) \Delta x \Delta y}$$
(5-1)

### Capacitor

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = C_{eze}(i, j, k) \times E_z^n(i, j, k) + C_{ezby}(i, j, k) \times \left( H_y^{n+1/2}(i, j, k) - H_y^{n+1/2}(i-1, j, k) \right) \\ + C_{ezbx}(i, j, k) \times \left( H_x^{n+1/2}(i, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j-1, k) \right)$$

donde

$$C_{eze}(i, j, k) = \frac{2\varepsilon_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) - \frac{2C\Delta z}{\Delta x \Delta y}}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{2C\Delta z}{\Delta x \Delta y}}$$

$$C_{ezby}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{2C\Delta z}{\Delta x \Delta y} \right) \Delta x}$$

$$C_{ezbx}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{2C\Delta z}{\Delta x \Delta y} \right) \Delta y}$$
(5-2)

**Resistor**

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = C_{eze}(i, j, k) \times E_z^n(i, j, k) + C_{ezby}(i, j, k) \times \left( H_y^{n+1/2}(i, j, k) - H_y^{n+1/2}(i-1, j, k) \right) \\ + C_{ezbx}(i, j, k) \times \left( H_x^{n+1/2}(i, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j-1, k) \right)$$

donde

$$C_{eze}(i, j, k) = \frac{2\varepsilon_z(i, j, k) - \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) - \frac{\Delta t \Delta z}{R \Delta x \Delta y}}{2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R \Delta x \Delta y}}$$

$$C_{ezby}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R \Delta x \Delta y} \right) \Delta x}$$

$$C_{ezbx}(i, j, k) = \frac{2\Delta t}{\left( 2\varepsilon_z(i, j, k) + \Delta t \sigma_z^e(i, j, k) + \frac{\Delta t \Delta z}{R \Delta x \Delta y} \right) \Delta y}$$
(5-3)

**Descargador de sobretensiones**

$$E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) = \frac{1 - \frac{\Delta t}{2R_m \varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta z}}{1 + \frac{\Delta t}{2R_m \varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta z}} E_z^n \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\Delta t}{2R_m \varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta z}} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left[ H_y^{n-1/2} \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta y \right. \\ \left. - H_y^{n-1/2} \left( i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta y - H_x^{n-1/2} \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \Delta x \right. \\ \left. + H_x^{n-1/2} \left( i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \Delta x \right] + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)}}{1 + \frac{\Delta t}{2R_m \varepsilon \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \Delta z}} \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left( \frac{V_m}{R_m} - I_m \right)$$
(5-4)

## 6. Bibliografía

- [1] S. Novo, Pronostico inmediato de tormentas convectivas por radar, Revista Brasileira de Meteorología, vol. 23, 2008.
- [2] F. R. Campos, Análisis de las fallas en transformadores causadas por la operación del pararrayos ante sobretensiones externas, Bogotá: Ingeniería e Investigación. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.
- [3] Ibáñez, C. Avendaño y H., Sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos, Conciencias. Univesidad.
- [4] E. Soto, Cálculo de campo electromagnético producido por un rayo para terreno no plano y su efecto en las tensiones inducidas en líneas de distribución., Manizales: Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Tesis de Maestría, 2010.
- [5] E. Pérez y E. Soto, Yaluk Draw, 2010.
- [6] E. Soto, Lightning induced voltages on overhead distribution networks placed over non-flat terrains. Tesis de Doctorado, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniera Eléctrica, Electrónica y Computación., 2014.
- [7] E. Pérez, Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución, Bogotá: Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Tesis de Doctorado, 2006.
- [8] C. Wagner y G. McCaNN, Induced Voltages on Transmission Lines, AIEE TRANSACTIONS, vol. 61, pp. 916-930, 1942.
- [9] S. Rusck, Induced Lightning Over-voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low-voltage Networks, Transactions of the Royal Institute of Technology, vol. 120, 1958.

- [10] A. Agrawal y J. Price, Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 22, 1980.
- [11] R. Thottappillil y V. Rakov, Calculation of lightning electromagnetic fields: A review, Current.
- [12] M. Rubinstein y M. Uman, Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: Application to lightning, IEEE Trans. Electromagn, 1989.
- [13] M. Master y M. Uman, Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, Amer. J Physics., vol. 51, 1983.
- [14] A.Zeddami y P.Deguque, Current and voltage induced on a telecommunication cable by a lightning stroke, Lightning Electromagnetics, pp. 377-400, 1990.
- [15] V.Cooray y S.Lundquist, Effect of Propagating on the Rise Times and the Initial Peaks of the Radiation Fields, Radio Science, vol. 18, pp. 409-415, 1983.
- [16] V.Cooray, Horizontal field generated by return strokes, Radio Science, vol. 27, no. 4, pp. 529-537, 1992.
- [17] V.Cooray, A model for Subsequent Return Strokes, Journal of Electrostatics, vol. 30, 1993.
- [18] M.Rubinstein, An Approximate Formula for the Calculation of the Horizontal Electric Field from Lightning at Close, Intermediate, and Long Range, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 3, 1996.
- [19] R. Thottappillil, J. Schoene y M. A. Uman, Return stroke transmission line model for stroke speed near and equal that of light, Journal of Geophysical Research., vol. 28, no. 18, pp. 3593- 3596, 2001.
- [20] R. Moini, S. Sadeghi, B. Kordi y F. Rachidi, An antenna-theory approach for modeling inclined lightning return stroke channels, Electric Power Systems Research, vol. 76, pp. 945-952, 2006.
- [21] Y. Baba, M. Ishii y S. Member, Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures, vol. 16, no. 2, pp. 324-328, 2001.
- [22] J. Cardoso y C. Sartori, An analytical-FDTD method for near LEMP calculation, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 36, pp. 1631-1634, 2000.

- [23] C. Yang y B. Zhou, Calculation Methods of Electromagnetic Fields Very Close to Lightning, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 1, pp. 133-141, 2004.
- [24] F. Heidler, J. Cvetić y B. V. Stanić, Calculation of Lightning Current Parameters, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 14, 1999.
- [25] F. Napolitano, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Paolone y F. Rachidi, Use of the Full-Wave Finite Element Method for the Numerical Electromagnetic Analysis of LEMP and its Coupling with Overhead Lines, Chengdu: in 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2011.
- [26] E. Pérez y H. Torres, Modeling and Experimentation of Lightning Induced Transients on Distribution Lines, 2010.
- [27] K. Yee, Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. Ap-14, 1966.
- [28] Y. Bo, Z. Bi-hua, C. Yong-guang y M. Xin, Influences of Mesh Size and Lightning Channel Length on Lightning Electromagnetic Field, *CEEM'2009/Xi'an*, pp. 349-352, 2009.
- [29] A. Mimouni, F. Rachidi y Z.-e. Azzouz., Electromagnetic environment in the immediate vicinity of a lightning return stroke, *Journal of Lightning Research*, vol. 2, pp. 64-75, 2007.
- [30] A. Mimouni, F. Rachidi y Z.-e. Azzouz, A finite-difference time-domain approach for the evaluation of electromagnetic to tall structures, *Journal of Electrostatics*, pp. 1-10, 2008.
- [31] A. Tatematsu, T. Noda y S. Member, Three-Dimensional FDTD Calculation of Lightning-Induced Voltages on a Multiphase Distribution Line With the Lightning Arresters and an Overhead Shielding Wire, vol. 56, no. 1, pp. 159-167, 2014.
- [32] Y. Baba y V. A. Rakov, Electromagnetic Fields at the Top of a Tall Building Associated With Nearby Lightning Return Strokes, vol. 49, no. 3, pp. 632-643, 2007.
- [33] V.A.Rakov y M.A.Uman, Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects o their application, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001.

- [34] C.E.Bruce y R.H.Golde, The Lightning Discharge, Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 88, 1941.
- [35] G.Diendorfer y M.A.Uman, An Improved Return Stroke Model with Specified Channel Base Current, Journal of Geophysical Research, vol. 95, no. D9, 1981.
- [36] M.A.Uman y D.K.Mclain, Magnetic Field of Lightning Return Stroke, Journal of Geophysical Research, vol. 74, 1969.
- [37] M.J.Master, Calculations of Lightning Return Strokes Models, Journal of Geophysical Research, vol. 85, 1985.
- [38] C.A.Nucci, C.Mazzetti, F.Rachidi y M.Ianoz, On lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations, Austria: Proceedings 19th International Conference on Lightning Protection (ICLP) Graz, 1988.
- [39] C.A.Nucci y F.Rachidi, Experimental validation of a modification to the transmission line model for LEMP calculations, Zürich: in Proc 8th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 1985.
- [40] F. Heidler, Traveling Current Source Model for LEMP Calculation, Zürich: in Proceedings of 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 1985.
- [41] R.Thottappillil y M.A.Uman, Comparison of lightning return stroke models, Journal of Geophysical Research, vol. 96, no. D9, pp. 22,903-22,914, 1993.
- [42] F.Heidler, Analytische blitzstromfunktion zur LEMP Berechnung (in German), Munich: in paper 1.9, 1985.
- [43] P. Chowdhuri y E. Gross, Voltages Induced on Overhead Multiconductor lines by Lightning Strokes, Proceedings IEEE, vol. 116, pp. 561-565, 1969.
- [44] C.D.Taylor, R.S.Satterwhite y C.W.Harrison, The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Transaction on Antenna propagation, vol. AP-13, 1965.
- [45] F. Rachidi, Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation fields, IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility, vol. 35, no. 3, 1993.
- [46] C. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz, V. Cooray y C. Mazzetti, Coupling Models for calculating induced overvoltage calculations: A comparison and consolidation, Hungary: in Proc.of the 22nd International Conference on Lightning Protection

- Budapest, 1994.
- [47] C. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz y C. Mazzetti, Comparison of two models for lightning induced overvoltage calculations, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 10, no. 1, pp. 330-339, 1995.
- [48] H.-M. Ren, B.-H. Zhou, V. A. Rakov, L.-H. Shi, C. Gao y J.-H. Yang, Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines Using a 2-D FDTD Method and Agrawal Coupling Model, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, pp. 651-659, 2008.
- [49] Umashankar, Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity, *IEEE Trans. Antennas Propagat*, vol. AP-35, no. pp. 8.
- [50] T. Noda y S. Yokoyama, Thin Wire Representation in Finite Difference, vol. 17, no. 3, pp. 840-847, 2002.
- [51] H. Torres, *El Rayo, Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá Facultad de Ingeniería - UNIBIBLOS, 2002.
- [52] J. Correa y D. Paniagua, Evaluación del desempeño de la red de localización de descargas atmosféricas de ISA en zona montañosa (Medellín-Antioquia). Tesis de Pregrado, Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2010.
- [53] H.-D. Betz, K. Schmidt, P. Oettinger y M. Wirz, Lightning Detection with 3D-Discrimination of Intracloud and Cloud-to-Ground Discharges, *J. Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, L11108, doi:10.1029/2004GL019821, 2004.
- [54] H.-D. Betz, K. Schmidt, B. Fuchs, W. P. Oettinger y H. Höller, Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning measured in the VLF/LF Regime, *J. of Lightning Research*, Vol. 2, 1-17, 2007.
- [55] H. Betz, D. Aranguren, J. López, J. Inampué y H. Torres, Cloud-to-Ground Lightning activity in Colombia and the influence of topography, Shanghai: International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2014.
- [56] H. Höller, H.-D. Betz, K. Schmidt, R. V. Calheiros, P. May, E. Houngninou y G. Scialom, Lightning characteristics observed by a VLF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2009.
- [57] H. Höller, H.-D. Betz, K. Schmidt, R. Calheiros, P. May, E. Houngninou y G. Scialom, LINET lightning characteristics observed on 4 different continents, Vienna:

- EGU General Assembly, 2009.
- [58] C. T. F. C4.404A, Cloud-to-Ground Lightning Parameters derived from Lightning Detection Systems. The effects of the performance, CIGRE Technical Brochure, num. 376, 2009.
- [59] Keraunos, «Identificación y análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes de distribución de energía eléctrica del SIN,» Comisión de regulación de energía y gas, Bogotá, 2013.
- [60] P. D. V. N. 2013-2014, Plan Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres, Norte de Santander, 2013.
- [61] M. Florez, A. Meneses, C. Gomez, F. Galviz, J. Hernández, R. Ramirez y S. Villamizar, Esquema de Ordenamiento territorial Municipio de San Calixto Norte de Santander, San José de Cúcuta, 2010.
- [62] F. Casas, TIERRAS. Soporte de la seguridad eléctrica, Bogotá D.C.: Icontec, 2010.
- [63] Codensa, «Likinormas,» Codensa, 01 09 2005. [En línea]. Available: [http://likinormas.micodensa.com/Especificacion/transformadores/et014\\_transformadores\\_poder\\_34\\_5\\_13\\_211\\_4](http://likinormas.micodensa.com/Especificacion/transformadores/et014_transformadores_poder_34_5_13_211_4). [Último acceso: 01 07 2016].
- [64] B. Y. C. W. C. 37, Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Studies with Emphasis on the FDTD Method. Chapter 3 Fundamental Theories of Electromagnetic Computation Methods, Kyoto: Doshisha University, 2015.
- [65] V. A. Rakov, S. Member y M. A. Uman, Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application, vol. 40, no. 4, pp. 403-426, 1998.
- [66] V. Cooray, The Lightning Flash, 2003.
- [67] M.J.Master y M.A.Uman, Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 9, 1984.
- [68] C. A. Nucci, F. Rachidi y M. V. Ianoz, Lightning Induced Voltages on Overhead Lines, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 35, no. 1, 1993.
- [69] J. López, Metodología para predicción de tormentas eléctricas a partir de mediciones de campo electrostático ambiental y sistemas de localización de rayos en zona montañosa. Tesis de Maestría, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2011.