

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA NO LINEAL DE UN SUELO DE  
TIERRA VEGETAL ANTE IMPULSOS DE TENSION TIPO RAYO USANDO UN  
ARREGLO CILINDRICO COAXIAL**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**PRESENTADO POR:**

**CARLOS ALBERTO BERNAL HERNÁNDEZ**

**Código: 20081007020**

**ANGIE ROCIO RAMOS ALBA**

**Código: 20082007073**

**ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL “FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS”  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ, 2016**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA NO LINEAL DE UN SUELO DE  
TIERRA VEGETAL ANTE IMPULSOS DE TENSIÓN TIPO RAYO USANDO UN  
ARREGLO CILINDRICO COAXIAL**



**UNIVERSIDAD DISTRICTAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**PRESENTADO POR:**

**CARLOS ALBERTO BERNAL HERNÁNDEZ**

**Código: 20081007020**

**ANGIE ROCIO RAMOS ALBA**

**Código: 20082007073**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:**

**Prof. HERBERT ENRIQUE ROJAS CUBIDES I.E. M.Sc. Ph.D(c)**

**UNIVERSIDAD DISTRICTAL “FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS”  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
BOGOTÁ, 2016**

# NOTA DE APROBACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá, 18 de agosto de 2016

# DEDICATORIA

---

*Dedico este trabajo de grado a mis padres Pedro Bernal y Blanca Hernández, y mis hermanos Jonny Bernal y Diana Bernal por su amor incondicional, comprensión, ayuda y apoyo durante toda mi vida académica, sobre todo en el proceso de pregrado en la universidad. A mis abuelos Rosa, Concepción (Q.E.P.D) y Victor (Q.E.P.D) por su amor, compañía y sabiduría en mi formación personal y crecimiento espiritual. A mis tí@s y prim@s Gloria, Eloisa, Lila, Victor (Q.E.P.D), Ilbo, Yaneth, Alex, Lorena y Julian por todo su cariño, compañía, apoyo y consejos durante toda mi vida. A mi compañera de tesis Angie Ramos por su conocimiento y amistad durante el trabajo de grado. A mis amigos y conocidos por esa felicidad tan grande de tenerlos siempre apoyándome. A mi Lunita, gracias a ti por tu amor incondicional y por tu compañía en sin fin de desvelos estudiando.*

*Dedicatoria  
Carlos Alberto Bernal Hernández*

*A mi mamita querida Olga Alba gracias a todo su trabajo y sacrificios culmino una etapa muy importante de mi vida. A German Virquez que ha sido como un padre para mí, gracias por su apoyo incondicional. A mis hermanos Jhon Ramos y Jessica Virquez gracias por ser mi compañía y motor de mi vida. A mi tía Cleo, mi tía Mireya y mi tío Marcos por aportar su granito de arena cuando más lo necesitaba. A John García por su amor incondicional, por sus consejos y por estar en los momentos difíciles durante este trabajo de grado. A Carlos Bernal por su empeño, por sus conocimientos y por brindarme su amistad. A mis amigos de la Universidad que estuvieron en todo momento, gracias por su ayuda, sus conocimientos y su cariño. A mi mascota fiel Estrella por su compañía sin condiciones que nunca me abandona.*

*Dedicatoria  
Angie Rocío Ramos Alba*

# AGRADECIMIENTOS

---

A la Universidad Distrital por brindarnos las bases para ser profesionales integrales y de calidad.

Al personal del laboratorio de alta tensión (LAT) y del laboratorio de suelos de la Universidad Distrital-Sede Tecnológica por brindarnos el espacio y los elementos necesarios para desarrollar las pruebas experimentales de este trabajo de grado.

Al Ing. Herbert Rojas, director de este proyecto de grado, por apoyar nuestra idea y hacerla realidad, por su paciencia, sus asesorías y conocimientos brindados.

Al Ing. Alexander Rodríguez por su ayuda, asesorías y su conocimiento durante las pruebas experimentales, por brindarnos su amistad y apoyo durante los momentos difíciles.

Al Ing. Raúl Montaña por brindarnos su asesoría valiosa durante el proceso teórico de este trabajo de grado y por dedicar parte de su tiempo para atender nuestras dudas.

Al Ing. John García por toda la asesoría brindada y conocimientos con respecto al tratamiento de suelos.

Al Ing. Wilmar Díaz por su ayuda y asesoría en la programación de la herramienta computacional.

Al Ing. Francisco Santamaría por las asesorías, el tiempo dedicado y los aportes a este trabajo de grado.

A los ingenieros Milton Salgado, Iván Bonilla y Johny Montaña por sus consejos y ayuda en todo momento.

A nuestras familias de las cuales recibimos todo su apoyo y amor incondicional a pesar de las dificultades.

A nuestros compañeros de universidad, de los cuales aprendimos mucho y nos dejaron grandes amistades.



# RESUMEN EJECUTIVO

---

Los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT) hacen parte importante de los circuitos eléctricos de baja, media y alta tensión. Del buen diseño de estos sistemas dependen la seguridad de los seres vivos y el buen funcionamiento y la preservación de la vida útil de los equipos eléctricos. Durante varias décadas, se han llevado a cabo investigaciones orientadas al desarrollo de modelos matemáticos que expliquen la respuesta no lineal de la relación tensión-corriente (V/I) durante la ionización del suelo por efecto de las corrientes que fluyen por el SPT. A partir de la formulación de estos modelos, basados en el comportamiento térmico y eléctrico del suelo, y de su validación mediante simulaciones y pruebas experimentales, se ha mejorado la eficiencia de los SPT ante descargas atmosféricas. Sin embargo, pese a las investigaciones realizadas y los resultados obtenidos, aún no se ha llegado a esclarecer la respuesta de gran variedad de tipos de suelos ante la presencia de descargas de alta energía o debido a fallas generadas dentro del sistema eléctrico.

Este trabajo de grado estudia de manera experimental, diferentes modelos propuestos en la literatura para explicar la respuesta no lineal de la relación V/I de suelos ionizados y su aplicación en un suelo de tierra vegetal ante impulsos de tensión tipo rayo en un arreglo cilíndrico coaxial. Para alcanzar este propósito se realizó una descripción del suelo y su respuesta no lineal, junto con un análisis de los modelos nacionales e internacionales más difundidos en la literatura. Posteriormente, se implementó el montaje experimental y se llevaron a cabo pruebas en el Laboratorio de Alta Tensión (LAT) de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital. A partir de estas pruebas se obtuvieron las variables físicas (tomadas en el momento de cada prueba) que fueron aplicadas a los modelos matemáticos. Posteriormente se realizó un análisis comparativo de los resultados teóricos con las señales de tensión y corriente tomadas de manera experimental. Finalmente, de los resultados obtenidos se concluyó cuál o cuáles modelos aproximan de mejor manera a la respuesta del suelo bajo estudio (ante impulsos de tensión tipo rayo) con la finalidad de brindar aportes que permitan avanzar en el conocimiento de este fenómeno.

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. OBJETIVOS .....	17
1.2.1. Objetivo General .....	17
1.2.2. Objetivos Específicos .....	17
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	17
<b>CAPÍTULO 2. EL SUELO .....</b>	<b>20</b>
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.....	20
2.2. SUELO DE TIERRA VEGETAL.....	21
2.3. RESPUESTA DEL SUELO ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	21
2.3.1. Fenómeno No disruptivo.....	22
2.3.2. Fenómeno Disruptivo.....	24
2.4. MECANISMO DE INICIO DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS EN EL SUELO .....	26
2.4.1. Mecanismo eléctrico de descarga.....	27
2.4.2. Mecanismo térmico de descarga .....	28
<b>CAPÍTULO 3. MODELOS FÍSICOS DE LA RELACIÓN V/I DEL SUELO.....</b>	<b>29</b>
3.1. MODELO DINÁMICO PROPUESTO POR LIEW & DARVENIZA .....	29
3.1.1. Estado de no ionización.....	29
3.1.2. Estado de ionización.....	30
3.1.3. Estado de recuperación.....	31
3.1.4. Modificaciones al Modelo Liew & Darveniza para Electrodo Coaxiales .....	32
3.2. MODELO FÍSICO-TÉRMICO PROPUESTO POR COORAY <i>ET. AL.</i> .....	34
3.2.1. Supuestos del Modelo .....	34
3.2.2. Modelamiento Matemático.....	34
A. Proceso de No-Ionización .....	35
B. Proceso de Ionización y Recuperación.....	35
3.2.3. Modificaciones al Modelo para Electrodo Coaxiales .....	37
3.3. MODELOS ANALÍTICOS PROPUESTOS POR PINEDA .....	37
3.3.1. Primer modelo analítico .....	37

A. Estado de no ionización.....	38
B. Estado de ionización.....	39
3.3.2. Segundo modelo analítico .....	40
A. Inicio de la Descarga (Fenómeno Decreciente).....	40
B. Extinción de la Descarga (Fenómeno Creciente) .....	41
3.4. MODELO PROPUESTO POR MOHAMAD <i>ET. AL.</i> ....	41
3.4.1. Proceso de pre-ionización .....	41
3.4.2. Proceso de Post-Ionización .....	42
<b>CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DE MODELOS.....</b>	<b>43</b>
4.1. INDICADORES ESTADÍSTICOS DE COMPARACIÓN .....	43
4.1.1. Porcentaje de Error Medio Cuadrático ( <b>MSPE</b> ).....	43
4.1.2. Coeficiente de Correlación Cruzada ( <b>CCC</b> ) .....	44
4.1.3. Coeficiente de Correlación de Pearson ( <b>rx<sub>y</sub></b> ).....	45
4.1.4. Coeficiente de Desigualdad de Theil ( <b>U</b> ).....	45
4.2. CRITERIO PARA LA EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA VALIDACIÓN .....	46
4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS UTILIZADOS .....	47
4.3.1. Entradas y Salidas de los Modelos .....	47
4.4. ESTRUCTURA DE LOS ALGORITMOS.....	48
4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO DE LIEW & DARVENIZA .....	48
4.6. VALIDACION DE LOS MODELOS PROPUESTOS POR PINEDA .....	50
4.6.1. Primer Modelo Analítico de Pineda .....	51
4.6.2. Segundo Modelo Analítico de Pineda.....	52
4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO DE MOHAMAD <i>ET. AL.</i> .....	53
4.8. VALIDACIÓN DEL MODELO DE COORAY <i>ET. AL.</i> .....	55
<b>CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL .....</b>	<b>58</b>
5.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL .....	58
5.2. ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA .....	58
5.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS MODELOS FÍSICOS.....	60
5.3.1. Análisis para el modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza.....	61
5.3.2. Análisis para el modelo Físico-Térmico propuesto por Cooray <i>et. al.</i> .....	62
5.3.3. Análisis para el primer modelo analítico propuesto por Pineda.....	64
5.3.4. Análisis para el segundo modelo analítico propuesto por Pineda y el modelo de Mohamad <i>et. al.</i> .....	65



5.4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN .....	67
<b>CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>68</b>
6.1. CIRCUITO DE GENERACIÓN DE IMPULSOS DE TENSIÓN .....	68
6.2. SISTEMA DE MEDIDA .....	68
6.3. OBJETO DE PRUEBA.....	69
6.3.1. Tipo de suelo utilizado .....	69
6.3.2. Probeta.....	70
A. Diseño del electrodo externo.....	70
B. Selección del electrodo externo.....	70
C. Diseño de la probeta de pruebas .....	74
6.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	75
6.4.1. Cambio en la profundidad de enterramiento e Incremento en el radio del electrodo interior .....	75
6.4.2. Contenido de agua en el suelo.....	76
6.4.3. Compactación del suelo .....	77
6.5. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS .....	79
<b>CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL .....</b>	<b>82</b>
7.1. EFECTO DEL INCREMENTO DEL RADIO DEL ELECTRODO INTERIOR .....	82
7.1.1. Estado Disruptivo.....	82
7.2. EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL ELECTRODO INTERIOR .	85
7.2.1. Estado Disruptivo.....	85
7.3. EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	87
7.3.1. Estado Disruptivo.....	88
7.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN UTILIZADOS PARA LA COMPARACION DE LOS MODELOS .....	90
7.5. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS MODELOS FÍSICOS.....	91
7.5.1. Caso de estudio N°1 .....	91
A. Modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza.....	91
B. Modelo físico-térmico propuesto por Cooray <i>et. al.</i> .....	93
C. Primer modelo analítico propuesto por Pineda.....	94
D. Segundo modelo analítico propuesto por Pineda .....	95
E. Modelo propuesto por Mohamad <i>et. al.</i> .....	96

7.6. RESUMEN DE RESULTADOS .....	99
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>101</b>
<b>APORTES.....</b>	<b>106</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>111</b>
DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS MODELOS .....	111
TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS EXPERIMENTALES.....	116

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Calculo de la resistividad aparente del suelo por métodos de medición.....	22
Tabla 4-1. Descripción del Coeficiente de Correlación Cruzada. ....	44
Tabla 4-2. Descripción del Coeficiente de Pearson. ....	45
Tabla 4-3. Descripción del Indicador de Desigualdad de Theil. ....	46
Tabla 4-4. Variables de Entrada de los Modelos Teóricos.....	47
Tabla 4-5. Parámetros iniciales para el modelo de Liew & Darveniza. ....	48
Tabla 4-6. Parámetros iniciales para el primer modelo analítico de Pineda.....	51
Tabla 4-7. Parámetros Iniciales para el segundo modelo analítico de Pineda.....	52
Tabla 4-8. Parámetros iniciales para el modelo de Mohamad <i>et. al.</i> .....	53
Tabla 4-9. Parámetros iniciales para el modelo de Cooray <i>et. al.</i> ....	55
Tabla 4-10. Resultados para los indicadores estadísticos evaluados.....	57
Tabla 5-1. Descripción de las áreas de trabajo de la ventana principal.....	59
Tabla 5-2. Datos de profundidad de enterramiento y radio del electrodo central para el análisis de sensibilidad.....	60
Tabla 6-1. Características de los electrodos .....	71
Tabla 6-2. Características de las Probetas Usadas por Otros Autores.....	72
Tabla 6-3. Profundidad de enterramiento y radio del electrodo interno usado en las pruebas experimentales.....	75
Tabla 6-4. Resumen del peso específico húmedo y seco del suelo con respecto a diferentes número de golpes aplicados sobre el suelo.....	79
Tabla 6-5. Casos de estudio evaluados en las pruebas experimentales.....	81
Tabla 7-1. Valores seleccionados para la evaluación del cambio del radio del electrodo central.....	82
Tabla 7-2. Valores seleccionados para la evaluación del cambio de la profundidad del electrodo central.....	85
Tabla 7-3. Valores seleccionados para la evaluación del cambio de la profundidad del electrodo central.....	88
Tabla 7-4. Criterios de evaluación cuantitativa y cualitativa. ....	91
Tabla 7-5. Caso de estudio seleccionado.....	91
Tabla 7-6. Datos de Entrada Modelo Liew & Darveniza-Caso N°1. ....	92
Tabla 7-7. Datos de Entrada Modelo Cooray <i>et al</i> -Caso N°1. ....	93
Tabla 7-8. Datos de Entrada Modelo Analítico 1 de Pineda-Caso N°1. ....	94
Tabla 7-9. Datos de Entrada Modelo Analítico 2 de Pineda-Caso N°1. ....	96
Tabla 7-10. Datos de Entrada Modelo de Mohamad <i>et. al.</i> -Caso N°1.....	97
Tabla 7-11. Resultados estadísticos cuantitativos-Caso N°1. ....	98
Tabla 7-12. Resultados estadísticos cualitativos-Caso N°1. ....	98
Tabla 7-13. Promedio de resultados obtenidos para los indicadores estadísticos .....	99
Tabla 7-14. Conteo para los indicadores estadísticos.....	100

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Horizontes del Suelo. Fuente [21] .....	21
Figura 2-2. Señales de Tensión y Corriente en estado de no Disrupción.....	23
Figura 2-3. Relación V/I e I/V mostrado en el trabajo realizado por Pineda [7]. .....	23
Figura 2-4. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo. ....	24
Figura 2-5. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el desarrollo de la descarga en el suelo.....	25
Figura 2-6. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante la extinción de la descarga en el suelo.....	25
Figura 2-7. Curva de la Relación V/I Resultante. ....	26
Figura 2-8. Mecanismo eléctrico de descarga a) Inicio de la descarga por medio de los canales de aire en el suelo;.....	27
Figura 3-1. Relación V/I lineal del suelo en estado de no descarga. Fuente Autores .....	30
Figura 3-2. Relación V/I del suelo en estado de descarga. Fuente Autores .....	31
Figura 3-3. Resultado de la relación V/I total calculada por Pineda para un electrodo coaxial, donde Re es la relación V/I calculada. Tomado de [7]. .....	33
Figura 3-4. Superficies equipotenciales rodeando una varilla vertical enterrada. Fuente Autores. .	35
Figura 3-5. Modelo analítico 1 propuesto por Pineda (a) Circuito eléctrico del SPT como electrodo concentrado; (b) Configuración electroica de las pruebas experimentales. Fuente [7], adaptado por autores. ....	38
Figura 3-6. Modelo analítico 2: Variaciones decrecientes y crecientes de la relación V/I del suelo. ....	40
Figura 4-1 Curvas usadas por Liew & Darveniza para el modelo. a) Impulso de corriente; b) Impulso de tensión. ....	49
Figura 4-2. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Liew & Darveniza. Fuente [6].....	49
Figura 4-3. Curvas usadas por Pineda para los dos (2) modelos analíticos. a) Impulso de tensión; b) Impulso de corriente.....	50
Figura 4-4. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Pineda para el primer modelo analítico. Fuente [7]. ....	51
Figura 4-5. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Pineda para el segundo modelo analítico. Fuente [7].....	53
Figura 4-6. Curvas usadas por Mohamad <i>et. al.</i> para el modelo. a) Impulso de tensión; b) Impulso de corriente.....	54
Figura 4-7. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Mohamad <i>et. al.</i> Fuente [2]. ....	55
Figura 4-8. Impulso de Corriente usado por Cooray <i>et. al.</i> para el modelo. ....	56
Figura 4-9. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Cooray <i>et. al.</i> ....	57

Figura 5-1. Ventana Principal de Lightning Soil Pro V1.0. ....	59
Figura 5-2. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el modelo de Liew & Darveniza. Fuente autores. ....	61
Figura 5-3. Variación de la relación V/I con respecto al cambio del radio del electrodo central para el modelo de Liew & Darveniza. Fuente autores. ....	62
Figura 5-4. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el modelo de Cooray <i>et. al.</i> Fuente autores. ....	63
Figura 5-5. Variación de la relación V/I con respecto al cambio del radio del electrodo central para el modelo de Cooray <i>et. al.</i> Fuente autores. ....	64
Figura 5-6. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el primer modelo analítico de Pineda. Fuente autores. ....	64
Figura 5-7. Variación de la relación V/I con respecto al cambio del radio del electrodo central para el primer modelo analítico de Pineda. Fuente autores. ....	65
Figura 5-8. Variación de la relación V/I para el modelo de Mohamad <i>et al.</i> a) Cambio del radio del electrodo central; b) Cambio de la profundidad de enterramiento del electrodo central. ....	66
Figura 5-9. Variación de la relación V/I para el segundo modelo analítico de Pineda. a) Cambio del radio del electrodo central; b) Cambio de la profundidad de enterramiento del electrodo central. ..	66
Figura 6-1. Circuito Generador de Impulso de Tensión. Fuente Autores. ....	68
Figura 6-2. Pasa-tamiz utilizado (izquierda) y aspecto final del suelo de tierra vegetal utilizado (derecha). ....	69
Figura 6-3. Electrodo de hojalata usados para las pruebas. ....	71
Figura 6-4. Señales de Tensión y Corriente a) Probeta con electrodo “grande”; b) Probeta con electrodo “pequeño”. Fuente Autores. ....	72
Figura 6-5. Electrodo Exterior Seleccionado. Fuente Autores. ....	73
Figura 6-6. Prueba de Resistencia para el electrodo externo. Fuente Autores. ....	74
Figura 6-7. Configuración cilíndrica coaxial usada en las pruebas experimentales para observar la descarga en un suelo de tierra vegetal. Fuente Autores. ....	74
Figura 6-8. Profundidades de enterramiento seleccionadas. Fuente Autores. ....	75
Figura 6-9. Proceso de Compactación a) Pesa utilizada de 2.5 kg (0.025 kN); b) Probeta circular de diámetro 0.2 m. Fuente Autores. ....	78
Figura 7-1. Señales obtenidas con el cambio del radio en el electrodo interior en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores. ....	84
Figura 7-2. Relación V/I obtenida con el cambio de radio en el electrodo interior en estado disruptivo. ....	84
Figura 7-3. Señales obtenidas con el cambio de la profundidad en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores. ....	86
Figura 7-4. Relación V/I obtenida con el cambio de profundidad en el electrodo interior en estado disruptivo. ....	87
Figura 7-5. Señales obtenidas con el cambio de la humedad en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores. ....	89
Figura 7-6. Relación V/I obtenida con el cambio de la humedad en estado disruptivo. Fuente Autores. ....	90

Figura 7-7. Comparación entre el modelo Liew & Darveniza y los resultados experimentales-Caso N°1. Fuente Autores.....	92
Figura 7-8. Comparación entre el modelo Cooray <i>et. al.</i> y los resultados experimentales-Caso N°1. ....	94
Figura 7-9. Comparación entre el primer modelo analítico de Pineda y los resultados experimentales-Caso N°1.....	95
Figura 7-10. Comparación entre el segundo modelo analítico de Pineda y los resultados experimentales-Caso N°1.....	96
Figura 7-11. Comparación entre el modelo Mohamad <i>et. al.</i> y los resultados experimentales-Caso N°1. ....	97



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

Este capítulo expone la descripción del problema abordado, los objetivos planteados y la importancia para llevar a cabo este trabajo de grado.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La principal función de los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT) es la protección de los seres vivos y de los equipos eléctricos por medio del despeje de altos niveles de corriente a tierra sin exceder los límites de operación de la red y los equipos [1], [2]. Uno de los componentes más importantes de los SPT son los electrodos metálicos que permiten conducir las corrientes no deseadas a tierra y el suelo (sistema natural) a través del cual se disipan dichas corrientes. Del buen funcionamiento de este conjunto electrodo-suelo depende que el sistema brinde seguridad ante las tensiones de paso y de contacto que aparecen en el sistema. Estas tensiones se presentan debido a los flujos de corriente hacia tierra durante una falla o debido a una descarga eléctrica atmosférica.

Actualmente, el diseño de un SPT se enfoca en una respuesta lineal del suelo cuya resistencia es constante a bajas frecuencias y bajos niveles de corriente. Sin embargo, debido a que el funcionamiento de los sistemas eléctricos es susceptible a los cambios de sus estructuras o configuraciones, el diseño de los SPT se ha orientado hacia el estudio de la no linealidad del suelo. Esta respuesta se presenta cuando ocurre la ionización del suelo alrededor del electrodo conllevando a un decrecimiento de la relación tensión-corriente  $(V/I)^1$  del conjunto suelo-electrodo [2], [3]. Esta respuesta no lineal se ve afectada por parámetros presentes en todos los SPT como son la geometría y conductividad del electrodo, la conductividad, humedad, contenido de químicos y salinidad del suelo, y por otras variables como la magnitud y duración de la descarga de energía que fluye a través del SPT [3], [4].

Debido a su naturaleza y al comportamiento impredecible del suelo se han realizado variedad de investigaciones orientadas a obtener modelos matemáticos que describan la variación no lineal de la relación tensión-corriente  $(V/I)$  del suelo ante descargas de alta energía [2], [5]. Sin embargo, muchos de los modelos propuestos funcionan de manera adecuada para un tipo de suelo específico y su aplicación depende de la manera en la que se realizaron las pruebas experimentales y de las variables eléctricas, físicas y térmicas que se tuvieron en cuenta.

En este contexto, diferentes tipos de suelos han sido objeto de estudio en pruebas experimentales encaminadas a encontrar nuevos aportes en el entendimiento del fenómeno de ionización del suelo.

---

<sup>1</sup> Para evitar contradicciones teóricas con respecto al concepto de impedancia o resistencia del suelo, en este trabajo se usará el término relación tensión-corriente  $(V/I)$  [7].



Uno de los tipos de suelo ampliamente estudiado es la arena. Autores como Liew & Darveniza (1974) [6], Pineda (2004) [7], Mohamad (2006) [2] y Montaña (2006) [8], realizaron pruebas de laboratorio usando este tipo de suelo debido a su fácil obtención, transporte, y lavado, a la baja retención de humedad y a que posee propiedades físicas directamente ligadas a la conducción eléctrica [6], [7]. Además de la arena, se han realizado otros estudios en diferentes tipos de arcillas arenosas y margosas, mezclas de arena y grava y combinaciones de tierra negra que presentan características físicas y químicas similares a la arena [2], [6], [7], [9]. Esta similitud ha facilitado el análisis del fenómeno de ionización en estos tipos de suelo

No obstante, aunque se han realizado importantes investigaciones en esta área, debido a la variedad de suelos y a su conformación geológica, varios autores recomiendan abordar la caracterización eléctrica de los suelos de manera local o regional evaluando las condiciones particulares de cada tipo de suelo [6], [7], [10], [11]. Por esta razón, este trabajo de grado centra su interés en el estudio y evaluación de la respuesta eléctrica del suelo de tierra vegetal, teniendo en cuenta que es un tipo de suelo que se encuentra en las capas superficiales de la mayoría de terrenos del país, y por lo tanto, es un tipo de suelo muy común en los SPT de baja y media tensión en Bogotá y otras ciudades de Colombia [12], [13].

Teniendo en cuenta que el suelo de tierra vegetal presenta una respuesta eléctrica que ha sido poco estudiada, aún no se conoce con exactitud su comportamiento cuando se encuentra ionizado por altas descargas de energía y cómo se ven afectados los SPT instalados en este tipo de suelo. Por esta razón, se hace necesario desarrollar un trabajo teórico-experimental que contribuya a encontrar una descripción aproximada de la respuesta no lineal de la tierra vegetal a causa del fenómeno de ionización [3], [8], [9], [14], [15]. A partir de este panorama se plantea la siguiente inquietud: ¿Es posible identificar y validar, a partir de resultados experimentales, un modelo matemático que describa la respuesta no-lineal de un suelo de tierra vegetal típico de la ciudad de Bogotá ante descargas de alta energía?

Con el fin de responder a esta inquietud, el trabajo de grado estará orientado a desarrollar las siguientes etapas que permitan cumplir con los objetivos planteados de manera adecuada:

- Realizar una revisión bibliográfica general y una selección de los modelos matemáticos que describen la respuesta no lineal del suelo debido a su ionización y que además, puedan ser aplicados a las características del suelo de tierra vegetal seleccionado en este proyecto
- Implementar una herramienta computacional para validar los modelos seleccionados usando datos proporcionados por otros autores [6], [7], [9]
- Desarrollar pruebas experimentales en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Distrital (LAT) con el propósito de recoger las variables físicas y eléctricas de las que dependen los modelos seleccionados
- Comparar, a partir de las pruebas experimentales, la respuesta no-lineal del suelo con los resultados proporcionados por los modelos matemáticos estudiados





- Analizar los resultados obtenidos presentando las conclusiones y sugerencias que permitan continuar con posteriores investigaciones

## **1.2. OBJETIVOS**

De acuerdo al planteamiento del problema, se han propuesto los siguientes objetivos para el desarrollo del presente trabajo de grado.

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar modelos que describan la respuesta no lineal de la relación tensión-corriente (V/I) de un suelo de tipo tierra vegetal ante impulsos de tensión tipo rayo mediante un montaje experimental de electrodos en arreglo coaxial.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar y evaluar al menos tres (3) modelos que describan la respuesta no lineal de la relación V/I del suelo, identificando para cada caso sus parámetros de entrada y de salida.
- Validar y realizar un análisis de sensibilidad de los modelos seleccionados a partir del desarrollo de una herramienta computacional en Matlab ® y el uso de datos experimentales de referencia (disponibles en la literatura).
- Obtener de manera experimental las características V/I de un suelo de tierra vegetal bajo impulsos de tensión tipo rayo mediante el diseño e implementación de un montaje de electrodos en arreglo cilíndrico coaxial, teniendo en cuenta las condiciones de humedad y compactación del suelo.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los arrojados por los modelos para determinar cuál o cuáles de ellos describen de manera aproximada la respuesta de la relación V/I del suelo de tierra vegetal ante impulsos de tensión tipo rayo.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

El sistema de puesta a tierra (SPT) es un elemento clave en cualquier instalación eléctrica. Su función principal es proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos. Además, permite asegurar que las personas dentro de una instalación y en sus vecindades no estén expuestas al peligro de las corrientes eléctricas de choque y las tensiones de paso y de contacto. Estas condiciones de falla son generadas



por causas internas en los equipos eléctricos o electrónicos que conforman la instalación o son producidas por fuentes externas como las descargas eléctricas atmosféricas (rayos) [1], [5], [16].

El diseño de los SPT debe garantizar una rápida respuesta ante la presencia de fallas o corrientes fuera de las condiciones normales de operación. Para cumplir con esta tarea, la manera más común de diseñar los SPT se basa en modelos lineales aproximados y la aplicación de criterios y recomendaciones presentadas en las normas *ANSI/IEEE Std 81-1983* e *IEEE Std 80-2000*. En estos estándares se modela la resistencia del suelo como un parámetro concentrado (mediante la medición de bajas magnitudes de corriente a bajas frecuencias) donde no ocurren efectos de ionización [17]–[19].

Aunque este modelo lineal presenta buenos resultados en el diseño del SPT a frecuencia industrial, con el avance de las investigaciones se ha planteado un escenario en el que se debe analizar la respuesta no lineal del suelo debido a las descargas de alta energía en los SPT. Esta respuesta impredecible del suelo se debe básicamente a dos procesos: el primero, a causa de los efectos térmicos que provoca el flujo de altas corrientes; el segundo, debido a la ionización del suelo originado por el incremento del campo eléctrico en las burbujas de aire atrapadas en el suelo [2].

Debido a la naturaleza compleja del fenómeno de ionización y la importancia de comprender cómo afecta este en el diseño de los SPT, se han propuesto una serie de modelos matemáticos en la literatura especializada. Estos modelos explican de manera aproximada tanto el efecto lineal como el efecto no lineal de la relación tensión-corriente ( $V/I$ ) el suelo bajo efectos de ionización. A diferencia de los modelos lineales, que incluyen pocos elementos debido a las simplificaciones realizadas, los modelos no-lineales tienen en cuenta parámetros eléctricos y térmicos adicionales que permiten describir de manera más completa la respuesta eléctrica del suelo [2], [6], [7], [15].

Aunque se han realizado investigaciones teóricas y experimentales que han aportado en el área de estudio, estas no han descrito de una forma completa la respuesta no lineal del suelo cuando se encuentra ionizado. Además, la mayoría de estos modelos matemáticos aún no han sido aplicados a diferentes tipos de suelos y bajo diferentes condiciones ambientales. Dentro de los suelos más estudiados se encuentran diferentes tipos de arcillas suaves arenosas y margosas, mezclas de arena y grava, tierra negra y el suelo que ha sido más estudiado, la arena de peña [2], [6], [7], [9].

Dada la gran diversidad de mezclas que se pueden presentar en un terreno, el análisis de los suelos bajo efectos de ionización puede llegar a ser complejo. Por esta razón, diferentes autores animan a continuar realizando estudios en diferentes clases de suelos que hagan parte de la conformación geológica de un terreno en particular [6], [7], [10], [11]. La tierra vegetal es un tipo de suelo que se encuentra en gran parte de los terrenos que cubren el área urbana de la ciudad de Bogotá. Además, este suelo está localizado en las capas superficiales del suelo, donde se encuentran instalados los SPT de baja y media tensión [13], [20].



Así mismo, este tipo de suelo presenta características propias que hacen interesante su estudio, entre las que se destacan que es un medio no homogéneo debido a la presencia de material orgánico e inorgánico y que el tamaño de sus granos permite que este tipo de suelo tenga una buena capacidad de retención de humedad. De ese contenido de humedad dependen varias características físicas entre ellas la resistividad, la capacitancia y la conductividad eléctrica, siendo este último parámetro un elemento importante para determinar el inicio de la ionización del suelo [15], [20]. Adicionalmente, dentro de la literatura especializada no se han encontrado trabajos que analicen con suficiencia el fenómeno de ionización en el suelo de tierra vegetal. Es por esto, que surge la necesidad de evaluar el comportamiento de este tipo de suelo mediante la validación de modelos matemáticos propuestos por la comunidad científica y el desarrollo de pruebas experimentales.

Conforme a lo anterior, este trabajo de grado tiene como propósito validar modelos matemáticos de ionización del suelo de tierra vegetal a partir de pruebas experimentales y del desarrollo de una herramienta computacional que facilite su aplicación y validación. Para este fin, se construirá una configuración de electrodos en arreglo cilíndrico coaxial y se controlará el contenido de humedad y el nivel de compactación del suelo. Esta configuración ha sido seleccionada debido a que representa de buena manera un electrodo enterrado en el suelo, evita las magnitudes excesivas de campo eléctrico entre el suelo y el aire, y además, permite un análisis matemático más simple [2], [7], [9].

Como alcance importante de este trabajo está el aportar nuevos resultados en el estudio de suelos que poseen una buena retención de humedad y así, contribuir a la mejora en el diseño de los SPT. Así mismo, ampliar y fortalecer las líneas de investigación del proyecto curricular de ingeniería eléctrica de la Universidad Distrital.



## CAPÍTULO 2. EL SUELO

---

En este capítulo se describe brevemente las principales características que tiene el suelo en general, y el suelo de tierra vegetal. Adicionalmente, se muestra el comportamiento de la relación tensión-corriente (V/I) del suelo en estado lineal o no disruptivo y en estado disruptivo ante descargas atmosféricas (rayos). Por último, se exponen los mecanismos eléctrico y térmico planteados por los cuales se puede dar inicio a la descarga o ionización en el suelo.

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo es un sistema heterogéneo<sup>2</sup> no uniforme, compuesto por diferentes estados de la materia: sólidos, líquidos y gaseosos. La materia orgánica e inorgánica representan el estado sólido, el agua y sales diluidas en el suelo corresponden al estado líquido y por último, el aire y el vapor de agua entre los espacios de los granos pertenecen al estado gaseoso. El conjunto de estos elementos ocupa un espacio en la corteza terrestre conformando distintas capas también conocidos como horizontes maestros [10], [12].

Estos horizontes se diferencian por las características físicas y químicas presentes en cada nivel del suelo, tales como: textura, estructura, color, conductividad, resistencia y capacitancia eléctrica y su capacidad de retención de humedad<sup>3</sup>. Estos horizontes son considerados como una herramienta importante para la evaluación de la naturaleza del suelo puesto que representan datos históricos de la evolución del planeta y reflejan los cambios climáticos [20], [21]. Los horizontes o capas del suelo son clasificados por letras según su composición química o física. El horizonte A es la capa superior del suelo formada por material orgánico; el horizonte B corresponde a la capa mineral del suelo y su actividad biológica es baja; y el horizonte C es la capa compuesta de roca madre donde ya no existe alguna actividad biológica. La Figura 2-1 muestra un esquema resumido de la conformación del suelo y su división por horizontes maestros.

---

<sup>2</sup> Se refiere a un sistema compuesto de diferentes materiales con distintas condiciones de origen, topografía, manejo, tipos de vegetación, etc. [44]

<sup>3</sup> Del contenido de humedad depende el intercambio iónico del suelo y los efectos de conductividad eléctrica e ionización en este [20]

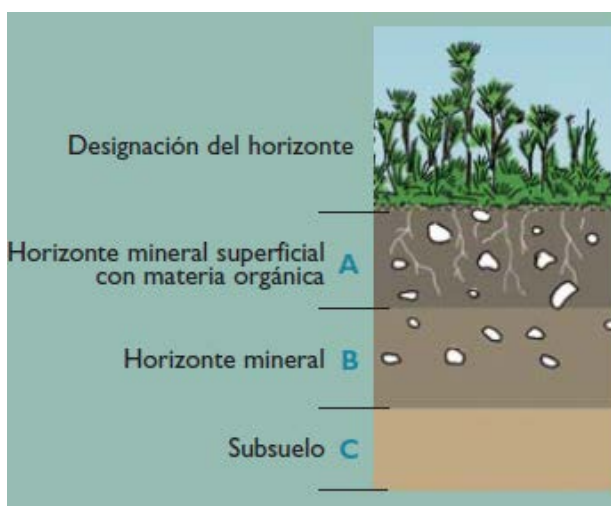


Figura 2-1. Horizontes del Suelo. Fuente [21]

## 2.2. SUELO DE TIERRA VEGETAL

El suelo de tierra vegetal se encuentra en la capa terrestre superior denominada *horizonte A* (mostrado en la Figura 2-1). Este horizonte se caracteriza porque contiene raíces, cuenta con una fuerte actividad biológica y su color se oscurece al aumentar el contenido en humus [21]. Por esta razón, el suelo de tierra vegetal contiene un elevado nivel de acidez (PH) y salinidad. Estos parámetros afectan de forma directa la conductividad eléctrica del suelo, siendo esta propiedad física un factor importante para el crecimiento de plantas y/o vida biológica [20]. Adicionalmente, dadas las características del suelo de tierra vegetal y a su alta retención de humedad, en este tipo de suelo el intercambio iónico se presenta de manera más fácil, favoreciendo el crecimiento de vida vegetal [12], [20].

En la ciudad de Bogotá las capas superficiales del suelo contienen un alto nivel de vida vegetal debido a la alta retención de humedad y al alto nivel de lluvias (precipitaciones anuales de 816 mm) [22]. Además, al estar ubicado en la región andina, el suelo de la sabana de Bogotá posee capas superficiales con un espesor de 50 cm o más y con una elevada cantidad de materia orgánica [20], [22]. Debido a estas características, el suelo de tierra vegetal es un suelo muy común en el área urbana de la ciudad de Bogotá, razón por la cual ha sido seleccionado como objeto de estudio en este trabajo de grado.

## 2.3. RESPUESTA DEL SUELO ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La respuesta que tiene el suelo cuando se encuentra sometido a grandes magnitudes de corriente como producto del flujo de altas corrientes provocadas por fallas o por descargas eléctricas atmosféricas (rayos) es un punto determinante en el diseño de los SPT para los sistemas de distribución y transmisión. Por esta razón, es necesario conocer el comportamiento real del suelo bajo fenómenos de ionización o disrupción cuando las altas corrientes son disipadas a tierra.



Investigaciones han demostrado que cuando el suelo está expuesto a grandes cantidades de energía y alcanza la disrupción, su resistividad varia de forma no lineal representando un decrecimiento considerable en la relación V/I del conjunto electrodo-suelo. Esta no linealidad depende en gran medida del tipo de suelo y sus características tales como: el contenido de humedad, la resistividad, la capacitancia y conductividad eléctrica [2], [6], [7], [15]. Sin embargo, dependiendo de la magnitud de corriente inyectada al suelo, este puede presentar dos fenómenos diferentes: No disrupción y disrupción.

### 2.3.1. Fenómeno No disruptivo

Debido a la complejidad de estudiar el comportamiento no lineal del suelo ante fenómenos de disrupción, actualmente los diseños de los SPT se llevan a cabo siguiendo los criterios de las normas ANSI/IEEE Std 81-1983 e IEEE Std 80-2000 [17], [18]. En general, el cálculo de la relación V/I (resistencia) del suelo se hace a partir de mediciones en las cuales se inyectan corrientes a baja frecuencia y donde no ocurren fenómenos de ionización. De esta manera, la resistencia de una porción del suelo es calculada de forma lineal mediante la ley de ohm.

Algunos de los métodos recomendados por las normas técnicas para realizar el cálculo de la resistencia del suelo son el método tetraelectródico de Wenner y el método de caída de potencial [17], [18]. En ambos métodos, la resistividad aparente del suelo  $\rho a$  es calculada en función de la relación V/I la cual corresponde a la resistencia de la porción de suelo estudiado  $R$ . Sus relaciones matemáticas se muestran en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Cálculo de la resistividad aparente del suelo por métodos de medición.

Método Wenner	Método de Caída de Potencial
$\rho a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$	$\rho a = \frac{2\pi L r R}{\ln\left(\frac{8Lr}{d}\right) - 1}$

En el método Wenner la resistividad del suelo depende de la profundidad de enterramiento de los electrodos  $b$  y de la distancia  $a$  entre los electrodos definidas durante la medición; mientras que en el método de caída de potencial la resistividad depende únicamente de las características geométricas del electrodo tales como la longitud  $Lr$  y el diámetro  $d$ .

De acuerdo a la Tabla 2-1 ambos métodos calculan la relación V/I (Resistencia) como un valor fijo, sin considerar los efectos sobre el conjunto electrodo-suelo cuando se aplican ondas de impulso o tipo rayo [10]. Algunos trabajos experimentales han mostrado que cuando se aplica un impulso de tensión al suelo y no se supera la rigidez dieléctrica de éste (estado no disruptivo), las señales de



tensión y corriente resultantes presentan formas de onda similares, y tienen un desfase muy pequeño como se muestra en la Figura 2-2 [2], [7], [23].

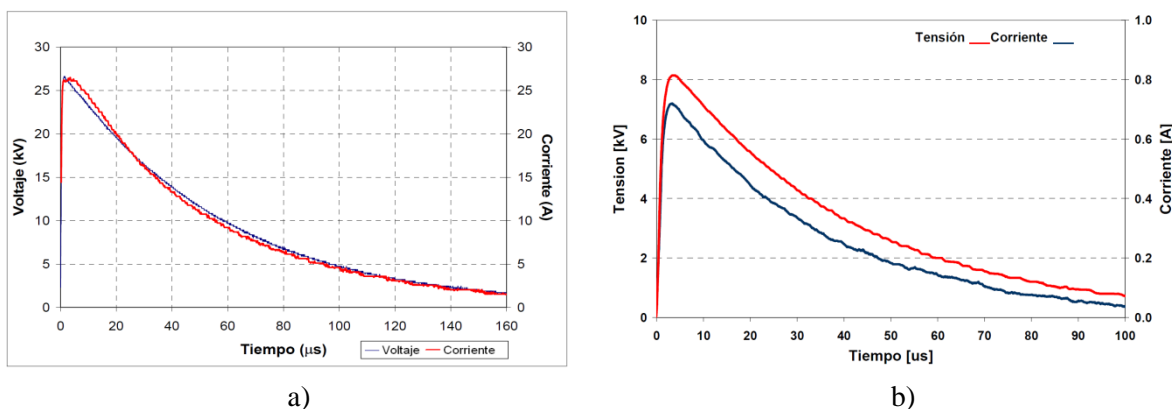


Figura 2-2. Señales de Tensión y Corriente en estado de no Disrupción.  
 a) Tomado de Pineda [7]; b) Tomado de Chica [23].

Si se estima el cociente para cada instante de tiempo (dato por dato) entre las señales de tensión y corriente de la Figura 2-2(a) se puede obtener la relación V/I dinámica del suelo mostrada en la Figura 2-3. En esta gráfica se observa que durante gran parte del tiempo en el que duran ambas señales (tensión y corriente), el valor de la relación V/I e I/V no varía de manera significativa y poseen una tendencia lineal en ambos casos.

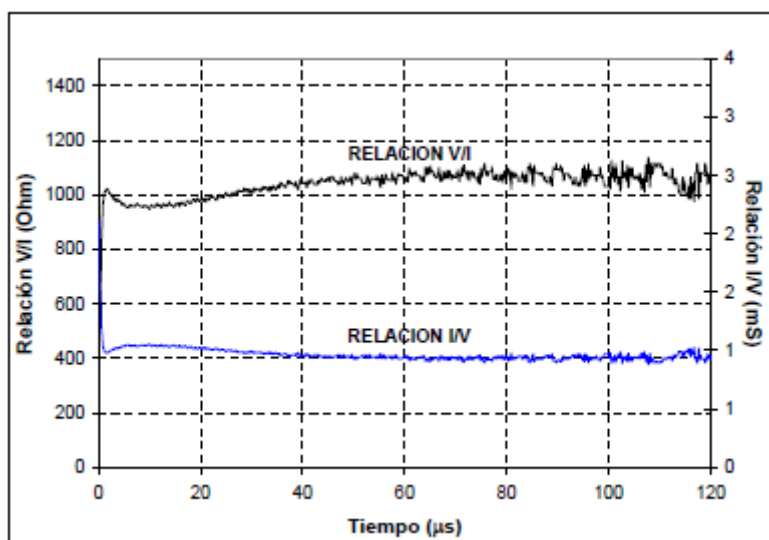


Figura 2-3. Relación V/I e I/V mostrado en el trabajo realizado por Pineda [7].



### 2.3.2. Fenómeno Disruptivo

Experimentalmente se ha observado que al inyectar magnitudes elevadas de corriente el suelo sufre fenómenos de descarga donde la relación  $V/I$  (Resistencia) pasa a ser un parámetro no lineal. Durante el evento disruptivo se observa que en los primeros instantes de tiempo la señal de tensión de la Figura 2-4 empieza a incrementarse permitiendo la conducción de corriente sobre el suelo. Una vez se llega al pico de tensión en  $1.2 \mu s$ , existe un pequeño tiempo de retardo en donde la tensión intenta disminuir rápidamente, para luego descender de manera exponencial mientras la magnitud de la corriente se eleva súbitamente dando inicio a la descarga en el suelo cerca de los  $1.7 \mu s$  [2], [7], [23].

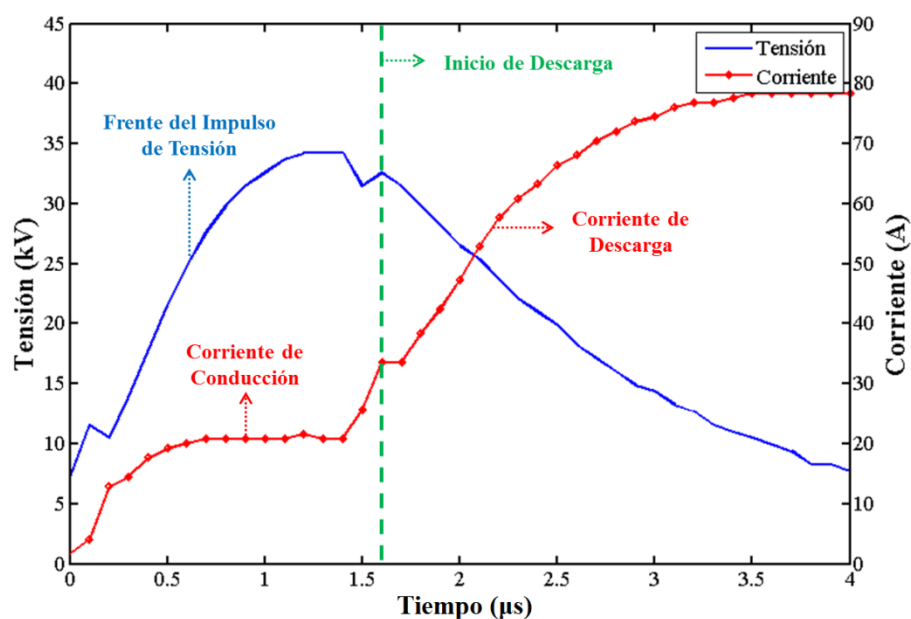


Figura 2-4. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el inicio de la descarga en el suelo.  
Fuente Autores.

Durante el avance de la descarga el valor de tensión inicia su descenso de manera exponencial, mientras la corriente alcanza su valor máximo cerca de los  $3.5 \mu s$  como se muestra en la Figura 2-5. Conforme la tensión sigue decreciendo exponencialmente hasta los  $13 \mu s$ , donde alcanza una magnitud de tensión diferente a cero conocida como tensión residual, la corriente empieza su caída de forma más lenta hasta alcanzar un valor mínimo a los  $27 \mu s$  donde cesa la descarga.



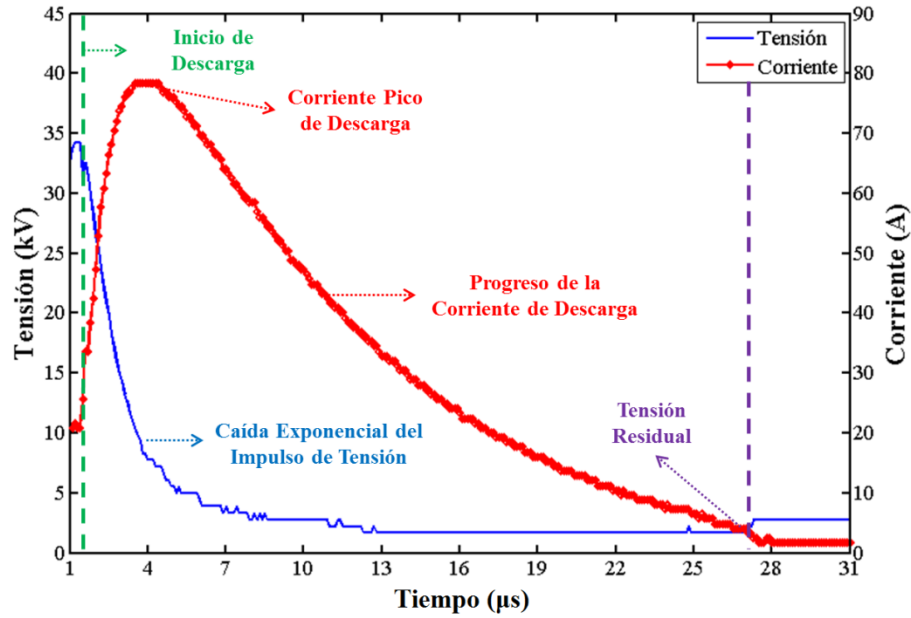


Figura 2-5. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante el desarrollo de la descarga en el suelo.  
Fuente Autores.

En el momento que la descarga finaliza (aprox. en 27  $\mu\text{s}$ ) la corriente de descarga alcanza su valor mínimo como se observa en la Figura 2-6. Por otra parte, en ese mismo instante de tiempo el valor de tensión muestra un pequeño crecimiento en su magnitud, manteniéndose así hasta los 37  $\mu\text{s}$  aproximadamente, donde cae levemente y se prolonga así hasta los 55  $\mu\text{s}$ .

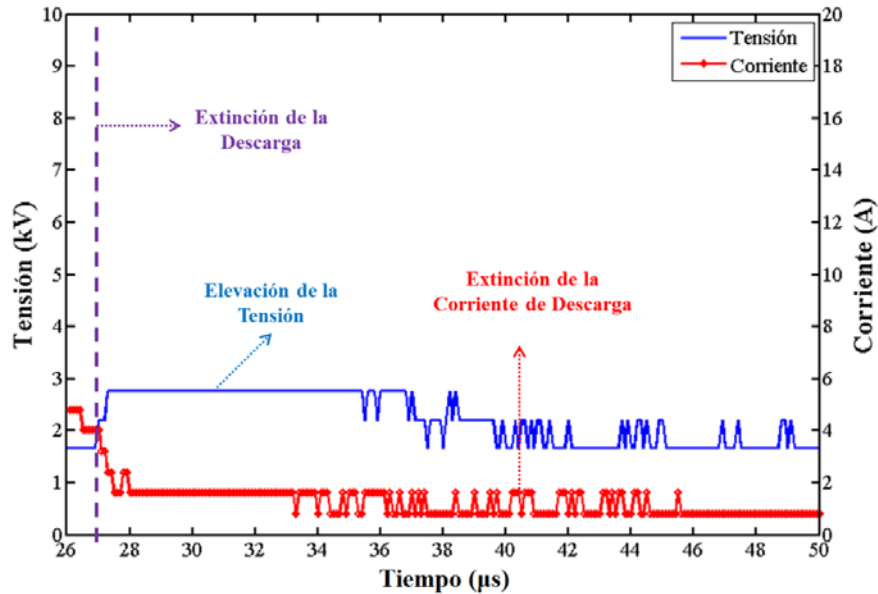


Figura 2-6. Comportamiento de las señales de tensión y corriente durante la extinción de la descarga en el suelo.  
Fuente Autores.



Al estimar el cociente entre la señal de tensión y corriente en estado de interrupción (mostradas entre la Figura 2-4 y la Figura 2-6) se obtiene la curva mostrada en la Figura 2-7. Donde se observa que en el instante de inicio de la descarga  $t_d$  ( $1.3 \mu\text{s}$ ) la relación  $V/I$  tiene un valor inicial  $Z_o = 1.645 \text{ k}\Omega$ . Luego, durante el desarrollo de la descarga el valor de la relación  $V/I$  cae hasta un valor mínimo  $Z_{min} = 641.8 \Omega$ , esta caída se produce en un tiempo  $t_{io}$  ( $11.4 \mu\text{s}$ ) con una pendiente negativa debido a la disminución de la tensión y el crecimiento de la corriente. Debido a que la corriente empieza a retroceder, la relación  $V/I$  inicia su recuperación en pendiente positiva hasta alcanzar un valor  $Z_f = 1.724 \text{ k}\Omega$ . El tiempo de duración de la recuperación de la relación  $V/I$  es llamado  $t_r$  ( $14.8 \mu\text{s}$ ).

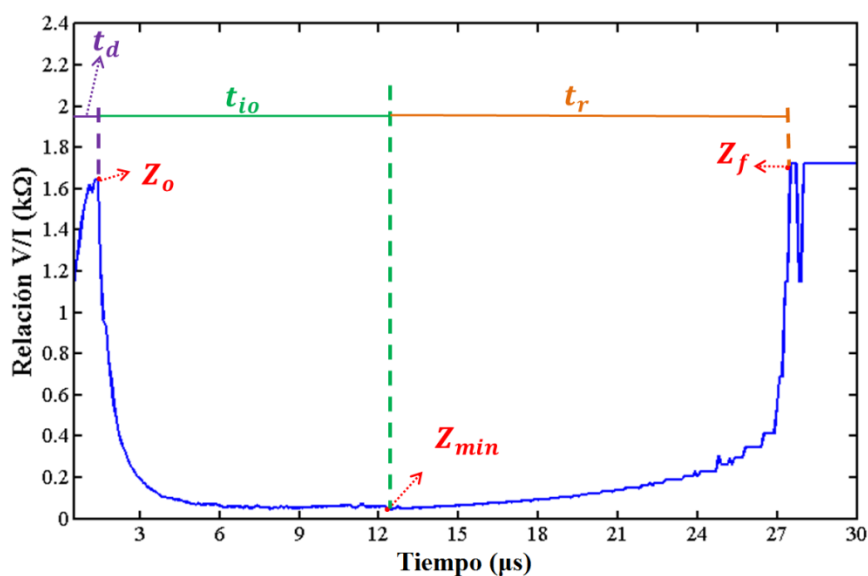


Figura 2-7. Curva de la Relación  $V/I$  Resultante.  
Fuente Autores.

## 2.4. MECANISMO DE INICIO DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS EN EL SUELO

En general, en todos los tipos de suelos existen los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso representados por los granos de material, el agua y el aire, respectivamente. Esto define una distribución espacial que permite el desarrollo y la extinción de la descarga. Los granos en el suelo determinan la dimensión del volumen total de éste, el agua que los recubre permiten que estos se interconecten y el suelo tenga una alta conductividad eléctrica. Entretanto, el aire queda atrapado en los pequeños espacios irregulares entre los granos de los cuales dependerá el valor de campo eléctrico disruptivo. A su vez, si es usada una configuración de electrodos (por ejemplo un arreglo coaxial), esta permitirá que dentro de estos espacios de aire haya presencia de descargas haciendo más complejo el fenómeno de descarga en el suelo.



Este comportamiento ha llevado a los investigadores a centrar esfuerzos en comprender dos subprocesos que se han observado experimentalmente: primero, el inicio de la descarga, que depende de los parámetros físicos del suelo tales como: la conductividad, la temperatura ambiente, la textura del suelo, etc. El segundo, relacionado con el desarrollo y extinción de la descarga, donde se evalúa cómo se reproduce y finaliza el fenómeno.

Así mismo, se han planteado dos mecanismos para explicar el inicio del proceso de descarga: el primero, plantea que el inicio de la descarga se genera debido al comportamiento eléctrico del suelo, mientras el segundo mecanismo describe que el inicio de la descarga se produce por el comportamiento térmico del suelo [6], [7], [9], [10].

### 2.4.1. Mecanismo eléctrico de descarga

Este mecanismo plantea que la descarga a través del suelo se inicia cuando la intensidad de campo eléctrico ( $E$ ) supera su valor crítico ( $E_c$ ) en las cavidades de aire presentes en el suelo  $E > E_c$  como se esquematiza en la Figura 2-8(a). Con el fin de analizar de forma más sencilla este mecanismo y su efecto sobre los SPT, se usa la configuración más sencilla, una varilla vertical de puesta a tierra enterrada en el suelo.

Al inyectar corriente de magnitud elevada y alta frecuencia a un electrodo de puesta a tierra se generan streamers convergiendo de forma radial al electrodo. A medida que estos avanzan por los canales de aire (asumiendo que estos son de muy baja resistividad) se generan descargas internas en el suelo que conllevan al fenómeno de ruptura eléctrica. Una vez existe la superación del gradiente de campo eléctrico crítico del medio  $E > E_c$ , se produce un ensanchamiento del electrodo donde se asumen cambios en su radio ( $r \rightarrow r'$ ) tal y como se muestra en la Figura 2-8 (b).

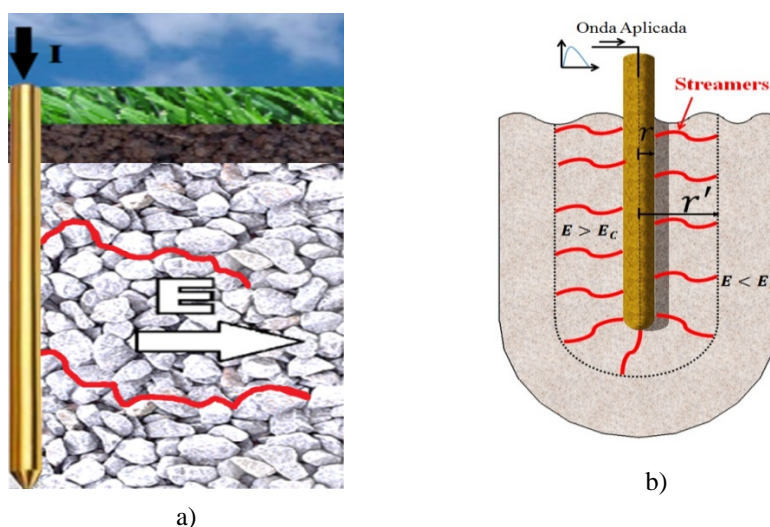


Figura 2-8. Mecanismo eléctrico de descarga a) Inicio de la descarga por medio de los canales de aire en el suelo; b) Avance de los streamers alrededor de la varilla de puesta a tierra. Fuente Autores



Debido a la gran cantidad de variables que se deben tener en cuenta para estudiar el fenómeno y considerando que el suelo no es homogéneo, se han propuesto varios modelos que describen el comportamiento del suelo mediante la superación del gradiente crítico del campo eléctrico. Estos modelos serán expuestos en detalle en el siguiente capítulo.

#### **2.4.2. Mecanismo térmico de descarga**

El inicio de la descarga en el suelo mediante este mecanismo hace énfasis en los canales de agua presentes en el suelo. Cuando la corriente circula por el suelo una porción de estos canales de agua empieza a calentarse por efecto Joule elevando la temperatura del medio hasta producir su evaporación. Al no quedar agua presente en estos canales se generan espacios de aire donde la resistencia se eleva súbitamente con el aumento de corriente hasta que el campo eléctrico supera el valor crítico, conduciendo a la descarga.

Los modelos propuestos basados en este mecanismo tienen en cuenta las propiedades térmicas del suelo tales como: conductividad, contenido de agua, temperatura, presión, etc. Adicionalmente, se basan en la teoría de transferencia del calor para explicar el comportamiento del inicio de la descargas en los suelos [7], [9], [10].



# CAPÍTULO 3. MODELOS FÍSICOS DE LA RELACIÓN V/I DEL SUELO

---

Desde hace varias décadas, se vienen realizando estudios que pretenden explicar la respuesta de los SPT cuando una descarga de alta energía produce ionización en el suelo. La importancia de entender este fenómeno ha llevado a la formulación de varios modelos físicos que describen desde el punto de vista eléctrico y/o térmico tanto la respuesta lineal (cuando no hay ionización) como la respuesta no lineal (cuando la ionización toma lugar) de la relación V/I del suelo. Este capítulo presenta varios de los modelos de mayor difusión en la literatura que explican el proceso disruptivo del suelo antes altas descargas de energía y describen de manera aproximada la relación V/I del suelo.

## 3.1. MODELO DINÁMICO PROPUESTO POR LIEW & DARVENIZA

Este modelo fue propuesto por Ah Choy Liew y Mat Darveniza en 1974 y describe las características no lineales de la relación V/I del suelo ante descargas de alta energía generadas por impulsos de corriente. Para su desarrollo, se llevaron a cabo las pruebas experimentales con electrodos verticales de puesta a tierra enterrados en tres tipos de suelos: arcilla suave arenosa, una mezcla de arena-grava y por último, arcilla margosa [6].

La variación de la relación V/I del suelo propuesta en este modelo se divide en tres regiones diferentes. La **región a** es la relación V/I de no descarga  $R_o$  donde aún no hay ionización; la **región b** es la relación V/I de descarga  $R_d$  en donde se da inicio a la descarga y el suelo ya presenta ionización; y por último, la **región c** es la relación V/I de recuperación  $R_r$  que representa el estado de recuperación del suelo o extinción de la descarga.

### 3.1.1. Estado de no ionización

En este estado inicial, donde aún no hay descarga, la densidad de corriente que atraviesa el suelo no ha superado el valor crítico ( $J < J_c$ ). Por consiguiente, la relación V/I de no descarga  $R_o$  se halla bajo condiciones lineales teniendo en cuenta la geometría del arreglo de electrodos. En la Figura 3-1 se representa el caso de una varilla enterrada en el suelo con resistividad eléctrica  $\rho_o$  (valor obtenido a baja tensión y baja frecuencia), donde la relación V/I inicial de no descarga  $R_o$  es definida en la Ecuación ( 3.1)

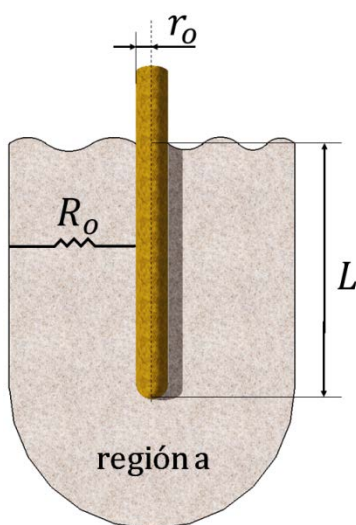


Figura 3-1. Relación V/I lineal del suelo en estado de no descarga. Fuente Autores

$$R_o = \frac{\rho_o}{2\pi L} * \ln \left[ \frac{r_o + L}{r_o} \right] \quad (3.1)$$

donde  $\rho_o$  es la resistividad eléctrica inicial del suelo,  $L$  es la longitud de enterramiento del electrodo interno y  $r_o$  es el radio del electrodo interno.

### 3.1.2. Estado de ionización

Este estado de descarga inicia cuando la corriente que penetra el suelo aumenta rápidamente, por lo que la densidad de corriente en el suelo supera su valor crítico ( $J_c < J$ ). Mediante la Ecuación (3.2) se puede calcular este valor de densidad de corriente.

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_o} \quad (3.2)$$

donde  $E_c$  es el campo eléctrico crítico del suelo. Una vez la corriente se incrementa, la resistividad del suelo comienza a decrecer desde su valor inicial  $\rho_o$  (estado de no ionización) hasta valores por debajo de este (estado de descarga). Este decaimiento en la resistividad se comporta de forma exponencial de acuerdo con la expresión de la Ecuación (3.3).

$$\rho_d = \rho_o e^{\frac{-t}{\tau_1}} \quad (3.3)$$

donde  $\rho_d$  es la resistividad de descarga del suelo,  $t$  es el tiempo medido desde que se da inicio al proceso de descarga y  $\tau_1$  es la constante de tiempo de ionización o descarga, es decir, cuando el



suelo pasa de un estado inicial pre-descarga a descarga con este valor definido de resistividad  $\rho_d$  se puede calcular la relación V/I de descarga  $R_d$  como se muestra en la Ecuación (3.4). Esta relación V/I corresponde a la zona afectada o **región b** mostrada en la Figura 3-2.

$$R_d = \frac{\rho_d}{2\pi L} \ln \left[ \frac{r_2(r_1 + L)}{r_1(r_2 + L)} \right] \quad (3.4)$$

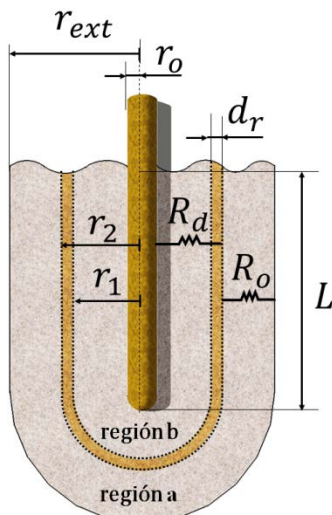


Figura 3-2. Relación V/I del suelo en estado de descarga. Fuente Autores

donde  $\rho_d$  es la resistividad de descarga del suelo,  $L$  es la longitud de enterramiento del electrodo interno y  $r_1$  y  $r_2$  son los radios de expansión del electrodo en cada condición de descarga. Esta progresión del radio que tendría cada zona de descarga tiene en cuenta la corriente que se alcanza en cada instante de tiempo. Para el caso de un electrodo enterrado, el radio es hallado para cada instante de tiempo a partir de la Ecuación (3.5).

$$r(t) = \sqrt{\frac{L^2}{4} + \frac{I(t)}{2J_c} - \frac{L}{2}} \quad (3.5)$$

donde  $L$  es la longitud de enterramiento del electrodo,  $I(t)$  es la corriente en cada instante de tiempo y  $J_c$  es la densidad de corriente crítica.

### 3.1.3. Estado de recuperación

Cuando la corriente alcanza su valor pico, el avance de la descarga eléctrica en el suelo llega al radio máximo o crítico  $r_c$  presentándose la menor resistividad. Para el caso de una configuración coaxial este radio podrá llegar a ser el mismo que el radio exterior  $r_{ext}$  si la energía disipada es lo



suficientemente grande. A medida que la corriente empieza a decrecer, la densidad de corriente en el suelo de nuevo es menor a su valor crítico ( $J < J_c$ ) razón por la cual se inicia la recuperación de su resistividad con un crecimiento de forma exponencial. Este estado de recuperación continúa hasta la extinción de la descarga donde el suelo alcanza el valor inicial de resistividad  $\rho_o$ . La resistividad de recuperación  $\rho_r$  es hallada mediante la Ecuación (3.6).

$$\rho_r = \rho_i + (\rho_o - \rho_i) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \left(1 - \frac{J}{J_c}\right)^2 \quad (3.6)$$

donde  $\rho_i$  es la resistividad inicial del proceso de recuperación o no descarga, es decir, la menor resistividad del suelo cuando la corriente alcanza su valor pico,  $\tau_2$  es la constante de tiempo de desionización, la cual es entendida como la cantidad de tiempo que tarda el suelo en recuperar su valor de resistividad inicial desde el estado de mínima resistividad, y  $t$  es el tiempo medido desde que se da inicio al proceso de recuperación o desionización. A partir de la Ecuación (3.7), se puede hallar la relación V/I de recuperación  $R_r$  que está en función de  $\rho_r$ .

$$R_r = \left[ \frac{\rho_r}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_{ext}(r_2 + L)}{r_2(r_{ext} + L)} \right) \right] \quad (3.7)$$

La suma de estas relaciones V/I (halladas a lo largo del proceso) representa la relación V/I no lineal o dinámica del suelo durante la ionización. Esta relación es definida mediante la Ecuación (3.8):

$$R = \left[ \frac{\rho_o}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_o + L}{r_o} \right) \right] + \left[ \frac{\rho_d}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_2(r_1 + L)}{r_1(r_2 + L)} \right) \right] + \left[ \frac{\rho_r}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_{ext}(r_2 + L)}{r_2(r_{ext} + L)} \right) \right] \quad (3.8)$$

donde  $r_{ext}$  corresponde al radio del electrodo exterior [6].

#### **3.1.4. Modificaciones al Modelo Liew & Darveniza para Electrodo Coaxiales**

Como se observó en las secciones anteriores, los resultados experimentales son obtenidos de pruebas sobre una configuración de suelo infinito. Pineda [7] y Roa-Méndez [26] intentaron adoptar los resultados experimentales tomados de una configuración coaxial a sus modelos teóricos sin conseguir resultados satisfactorios. Un ejemplo de estos resultados se muestra en la Figura 3-3. Estas investigaciones concluyeron que si bien la respuesta del modelo Liew & Darveniza es acertada para el proceso de ionización, presenta problemas en la zona de recuperación del valor de relación V/I.



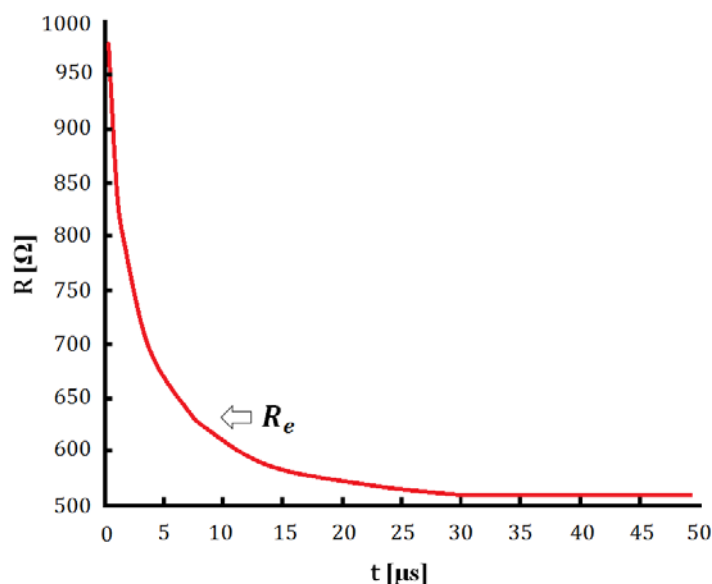


Figura 3-3. Resultado de la relación V/I total calculada por Pineda para un electrodo coaxial, donde  $R_e$  es la relación V/I calculada. Tomado de [7].

Debido a esto, y que para este trabajo se definió que las pruebas experimentales se desarrollarían sobre una configuración coaxial, se deben realizar algunas correcciones al modelo para obtener un mejor resultado. A consecuencia de la limitación espacial dada por el electrodo exterior, a este modelo se le realizaron las siguientes modificaciones:

- Se obtuvo el valor de  $r_c$  que representará el mejor resultado en el modelo. Sin embargo, esto se cumple si y solo si  $r_o < r_c \leq r_{ext}$
- La variación del radio en el tiempo tendrá un  $dr_1$  constante y dependiente de la duración del proceso de ionización o caída de la relación V/I. A su vez, tendrá un  $dr_2$  constante y dependiente de la duración del proceso de recuperación de la misma. A comparación del modelo original, el cambio del radio para este trabajo será lineal e independiente de la variación de corriente en el tiempo
- Dentro de cálculo de la relación V/I total del modelo, la relación V/I del volumen del suelo donde no se alcanza la ionización estará limitada por el radio del electrodo exterior. Por esta razón, la Ecuación (3.8) se modificó como se muestra en la Ecuación (3.9).

$$R = \left[ \frac{\rho_o}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_{ext}(r_c + L)}{r_c(r_{ext} + L)} \right) \right] + \left[ \frac{\rho_d}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_2(r_1 + L)}{r_1(r_2 + L)} \right) \right] + \left[ \frac{\rho_r}{2\pi L} * \ln \left( \frac{r_c(r_2 + L)}{r_2(r_c + L)} \right) \right] \quad (3.9)$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el radio máximo alcanzado por  $r_c$  podrá ser igual al radio del electrodo exterior y la zona ionizada ocupará el total del volumen encerrado en la configuración



coaxial. A su vez, el proceso de recuperación abarcará el volumen entre el radio exterior y el electrodo central, dando por terminado el proceso de variación de la relación V/I en una descarga.

### **3.2. MODELO FÍSICO-TÉRMICO PROPUESTO POR COORAY *ET. AL.***

Propuesto por Vernon Cooray *et. al.* en el año 2004, este modelo representa el comportamiento dinámico de la relación V/I del conjunto electrodo-suelo ante descargas de alta energía. Para la validación de este modelo, los autores realizaron una comparación entre los resultados arrojados en simulaciones aplicando un impulso de corriente y los resultados obtenidos experimentalmente por autores como Liew y Darveniza en [6] y Bellaschi en [27].

#### **3.2.1. Supuestos del Modelo**

Con el fin de aplicar de manera comprensible el modelo propuesto por Cooray, se deben tener en cuenta las siguientes suposiciones [15]:

- Alrededor de un electrodo central se generan campos equipotenciales conformados por una sección cilíndrica y otra semiesférica. Estas superficies son concéntricas y simétricas durante todo el proceso de ionización
- El proceso de ionización comienza cuando el valor de campo eléctrico supera un valor crítico dependiente de las condiciones del suelo. Este valor puede ser obtenido directamente de las mediciones de tensión y corriente experimentales
- El mecanismo de inicio exacto de la descarga es desconocido y requiere de mayor investigación. Sin embargo, en este modelo se asume que el suelo contiene espacios de aire que afectan su conductividad y por lo tanto, el inicio de la ionización. Cuando se inyectan grandes cantidades de energía al suelo estos espacios de aire sufren pequeñas descargas aumentando la intensidad de campo eléctrico. Al llegar a valores de campo eléctrico crítico el aire se calienta de tal forma que se genera una disrupción

#### **3.2.2. Modelamiento Matemático**

Para el modelo Cooray, los valores de relación V/I del conjunto electrodo-suelo se modelan en un proceso de no-ionización y otro de ionización. El desarrollo matemático del modelo se ha representado en la Figura 3-4, donde se observan las superficies equipotenciales para una configuración sencilla de puesta a tierra (varilla vertical enterrada en el suelo). Además, de la representación gráfica el modelo se describe a continuación.

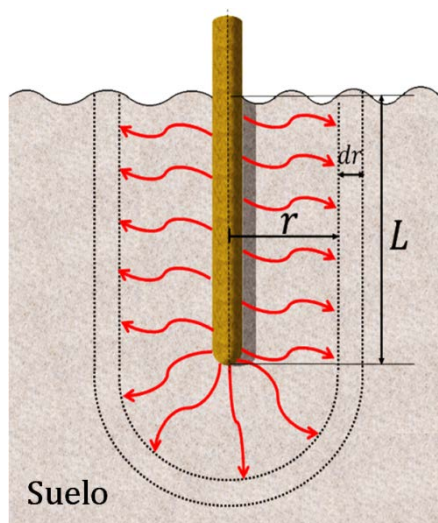


Figura 3-4. Superficies equipotenciales rodeando una varilla vertical enterrada. Fuente Autores.

### A. Proceso de No-Ionización

En un instante de tiempo antes de alcanzar el valor de campo eléctrico crítico ( $t < t_o$ ), el valor de relación V/I se considera dependiente únicamente de la geometría del arreglo electrodo-suelo como se expresa en la Ecuación (3.10).

$$dR(t < t_o) = \frac{dr}{\sigma_s (2\pi rL + 2\pi r^2)} \text{ donde } r < r_c \quad (3.10)$$

De acuerdo a la Ecuación (3.10), el suelo no tiene suficiente energía para iniciar el proceso de descarga en cada uno de los espacios de aire presentes en este y que al contrario, los granos que lo conforman están recubiertos de agua.

### B. Proceso de Ionización y Recuperación

Cuando se ha alcanzado la energía suficiente para evaporar el contenido de agua que recubren los granos del suelo el valor de campo eléctrico alcanza su valor crítico y la temperatura en estos se eleva de manera casi instantánea a un valor  $T_o$ . Para cada uno de los campos equipotenciales dentro del volumen de ionización, localizados a una distancia  $r$  del electrodo central y de espesor  $dr$ , la densidad de corriente en el tiempo se expresa en la Ecuación (3.11).

$$J(t) = \frac{I(t)}{(2\pi rL + 2\pi r^2)} \quad (3.11)$$



donde  $I(t)$  es la corriente inyectada al suelo en función del tiempo y  $L$  es la longitud enterrada del electrodo central. Se considera un valor de densidad de corriente crítica cuando se alcanza el valor de campo eléctrico crítico en el tiempo  $E_b$ , el cual se puede obtener de manera experimental a partir de la Ecuación (3.12).

$$J_o = \sigma_s * E_b \quad (3.12)$$

donde  $J_o$  es el valor de densidad de corriente crítica,  $\sigma_s$  es la conductividad del suelo. Teniendo el valor de densidad de corriente crítica  $J_o$ , para un valor pico de corriente se puede despejar el valor del radio donde más allá de este no alcanza a producirse la ionización  $r_c$ , mediante la Ecuación (3.13).

$$J_o = \frac{I_p}{(2\pi r_c + 2\pi r_c^2)} \quad (3.13)$$

donde  $I_p$  es la máxima corriente alcanzada por el impulso y  $r_c$  es el radio crítico o máximo alcanzado por la ionización. La relación V/I más allá del radio crítico  $r_c$  donde no se alcanza la ionización puede ser calculada mediante la Ecuación (3.14).

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s (2\pi rL + 2\pi r^2)} \quad (3.14)$$

donde  $R_s$  es la relación V/I de no ionización y  $r$  es el radio más allá de  $r_c$ . Dentro del volumen de suelo donde se supera el valor de campo eléctrico crítico, la conductividad total pasa a ser una suma entre la conductividad del suelo y la conductividad del aire que es dependiente de la variación de temperatura sufrida por efectos de la ionización. Para este proceso, el valor de relación V/I de ionización  $R$  se define en la Ecuación (3.15).

$$dR(t \geq t_o) = \frac{dr}{\sigma_s + F \left( \frac{T_o}{T_a} \right) \sigma_a (2\pi rL + 2\pi r^2)} \text{ donde } r < r_c \quad (3.15)$$

donde,  $T_o$  es la temperatura que tiene la fracción de volumen,  $F$  es una fracción del volumen del suelo bajo prueba dentro del cilindro exterior,  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $\sigma_s$  la conductividad del suelo y  $\sigma_a$  la conductividad del aire<sup>4</sup>. Por último, la Ecuación (3.16) representa la relación V/I total del SPT (conjunto electrodo-suelo) en función del tiempo como el resultado de la sumatoria entre la relación V/I de no ionización (que representa la respuesta lineal) y la relación V/I de ionización (que representa la respuesta no lineal del suelo) [15].

<sup>4</sup> En este modelo los parámetros  $T_o$ ,  $S$  y  $F$  deben ser encontrados mediante comparaciones entre los datos experimentales y teóricos.



$$R(t) = \int_{r_o}^{r_c} dR(t) dr + \int_{r_c}^{\infty} dR_S dr \quad (3.16)$$

### 3.2.3. Modificaciones al Modelo para Electrodo Coaxiales

Al igual que el modelo presentado por Liew & Darveniza [6], el modelo propuesto por el Prof. Cooray está pensado para obtener la relación V/I en una configuración de suelo infinito. Por esta razón, también se realizaron modificaciones al modelo que tienen que ver con la inclusión del radio exterior  $r_{ext}$  en los límites de integración de la Ecuación (3.16). Los cambios realizados han sido hechos teniendo en cuenta las mismas consideraciones presentadas en la sección 3.1.4, obteniendo así la Ecuación (3.17).

$$R(t) = \int_{r_o}^{r_c} dR(t) dr + \int_{r_c}^{r_{ext}} dR_S dr \quad (3.17)$$

## 3.3. MODELOS ANALÍTICOS PROPUESTOS POR PINEDA

Este trabajo fue propuesto por el Prof. Pineda en el año 2004 [7]. Se caracteriza por ser uno de los pocos aportes a nivel nacional que se han desarrollado en esta área de estudio. Este trabajo presenta un análisis para la relación dinámica de tensión-corriente consistente en dos modelos analíticos aproximados. Para las pruebas experimentales se aplicó un impulso de tensión tipo rayo a un montaje de arreglo coaxial cilíndrico. El suelo bajo prueba fue arena de peña y se varió su contenido de humedad. A continuación, se presenta una breve descripción de cada modelo analítico.

### 3.3.1. Primer modelo analítico

Este modelo plantea que cuando el suelo se encuentra bajo un fenómeno disruptivo, el electrodo interno (varilla) tiene un ensanchamiento de su radio ( $r_o$ ) a causa de la ionización hasta alcanzar el máximo radio que corresponde al radio del electrodo externo ( $r_c$ ). En este modelo el conjunto electrodo-suelo se compone de un conjunto de parámetros RLC concentrados: la inductancia ( $L$ ) dependiente de la longitud del electrodo enterrado ( $L$ ), el cual es conectado en serie con un arreglo en paralelo de la relación V/I de puesta a tierra ( $R_{PT}$ ) y la capacitancia del arreglo ( $C$ ) relacionada a su comportamiento dieléctrico. Una representación gráfica de esta explicación se puede observar en la Figura 3-5.

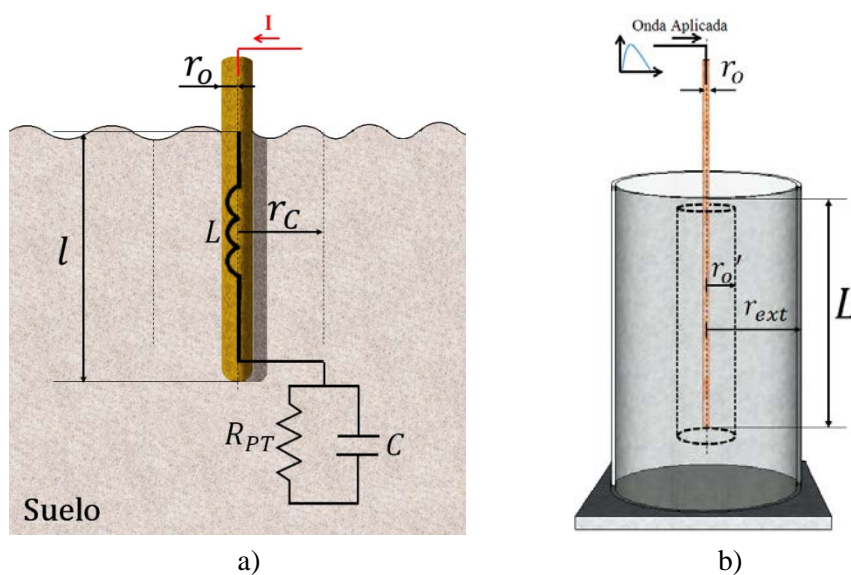


Figura 3-5. Modelo analítico 1 propuesto por Pineda (a) Circuito eléctrico del SPT como electrodo concentrado; (b) Configuración electroica de las pruebas experimentales. Fuente [7], adaptado por autores.

Al igual que los otros modelos mencionados previamente, este primer modelo de Pineda se desarrolla en diferentes estados: El primer estado de no ionización y el segundo estado de ionización.

### A. Estado de no ionización

Esta etapa transcurre antes de presentarse ionización en el suelo. En la Ecuación (3.18) se expresa la impedancia equivalente ( $Z$ ) para una varilla de puesta a tierra enterrada en el suelo.

$$Z = j\omega L + \frac{R_{PT} * \left[ \frac{1}{j\omega C} \right]}{R_{PT} + \left[ \frac{1}{j\omega C} \right]} \quad (3.18)$$

Realizando los cálculos pertinentes y agrupando la parte real e imaginaria, la Ecuación (3.18) es ajustada a la expresión mostrada en la Ecuación (3.19).

$$Z = \frac{R_{PT}}{1 + (\omega R_{PT} C)^2} + j\omega \left[ L - \frac{R_{PT}^2 C}{1 + (\omega R_{PT} C)^2} \right] \quad (3.19)$$

donde  $Z$  esta dada en  $[\Omega]$  y los parámetros concentrados de  $R_{PT}$ ,  $L$  y  $C$  pueden ser hallados mediante el análisis en baja frecuencia del circuito mostrado en la Figura 3-5(a). De esta manera se tiene que:

$$R_{PT} = \frac{\rho_o}{2\pi l} * \ln \left[ \frac{r_{ext}}{r_o} \right] \quad (3.20)$$



$$L = \frac{\mu l}{2\pi} * \ln \left[ \frac{r_{ext}}{r_o} \right] \quad (3.21)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[ \frac{r_{ext}}{r_o} \right]} \quad (3.22)$$

Realizando la sustitución de las Ecuaciones (3.20), (3.21) y (3.22) en la Ecuación (3.19) se obtiene:

$$Z = \frac{1}{2\pi l} \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_o} \right) \left[ \frac{\rho_o}{1 + (\omega\epsilon\rho_o)^2} + j\omega \left[ \mu l^2 - \frac{\rho_o^2 \epsilon}{1 + (\omega\epsilon\rho_o)^2} \right] \right] \quad (3.23)$$

donde  $\rho_o$  es la resistividad eléctrica inicial del suelo,  $l$  es la longitud de enterramiento del electrodo interno,  $r_o$  es el radio del electrodo interno,  $r_{ext}$  es el radio del electrodo externo,  $\mu$  es la permeabilidad relativa del suelo y  $\epsilon$  es la permitividad relativa del suelo.

### B. Estado de ionización

La segunda etapa del primero modelo propuesto por Pineda se debe al avance de la carga eléctrica sobre las superficies equipotenciales presentes en el suelo de prueba dando inicio a la aparición de *streamers* que van desde el electrodo interno hacia el externo. Además, se tiene en cuenta que la carga eléctrica depositada en el radio  $r_o$  será desplazada hacia  $r_o'$  como se observa en la Figura 3-5(b). La variación de la impedancia debido al incremento del radio efectivo está dada por la Ecuación (3.24).

$$Z = \frac{1}{2\pi l} \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_o'} \right) \left\{ \frac{\rho_o}{1 + (\omega\epsilon\rho_o)^2} + j\omega \left[ \mu l^2 - \frac{\rho_o^2 \epsilon}{1 + (\omega\epsilon\rho_o)^2} \right] \right\} \quad (3.24)$$

Debido a que  $r_o < r_o' < r_{ext}$ , cuando los *streamers* hayan alcanzado el radio del electrodo exterior ( $r_{ext}$ ) no habrá diferencia de potencial, por lo que el término del logaritmo natural tenderá a cero y por lo tanto  $Z' = 0$ . De esta forma, la Ecuación (3.24) se puede reducir así:

$$Z' = K * \ln \left( \frac{r_{ext}}{r_o'} \right) \quad (3.25)$$

donde  $K$  corresponde a los términos encerrados entre corchetes en la Ecuación (3.24) Adicionalmente, este modelo está basado en dos tiempos que se hallan determinando las velocidades de ensanchamiento (Ecuación (3.26)) y adelgazamiento del electrodo (Ecuación (3.27)) [7].

$$V_1 = \frac{r_{ext} - r_o}{t_1} \quad (3.26)$$



$$V_2 = \frac{r_{ext} - r_o}{t_2} \quad (3.27)$$

donde  $t_1$ , es el tiempo en el que  $Z'$  decrece cuando los *streamers* avanzan desde  $r_o$  hasta  $r_{ext}$  y  $t_2$  es el tiempo donde  $Z'$  aumenta y los *streamers* avanzan desde  $r_{ext}$  hacia  $r_o$ . A partir de esto, se puede obtener una curva de  $Z'$  en función del tiempo asumiendo una velocidad constante de descarga [7].

### 3.3.2. Segundo modelo analítico

Este modelo está basado en las variaciones crecientes y decrecientes de la relación dinámica V/I que se relacionan con procesos físicos de carácter exponencial observados en las pruebas experimentales. El proceso de la descarga observado en dichas pruebas (véase Figura 3-6), se divide en dos procesos: el inicio de la descarga (fenómeno decreciente de la relación dinámica V/I) y la extinción de la descarga (fenómeno creciente de la relación dinámica V/I) [7].

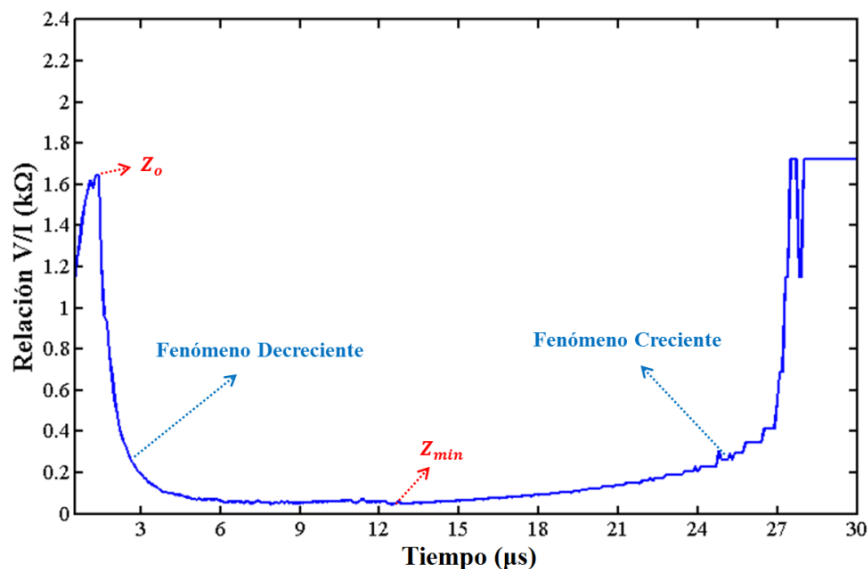


Figura 3-6. Modelo analítico 2: Variaciones decrecientes y crecientes de la relación V/I del suelo. Fuente [7] adaptado por Autores.

#### A. Inicio de la Descarga (Fenómeno Decreciente)

El primer proceso se inicia producto de un ascenso rápido en la magnitud de corriente inyectada en el suelo donde en los espacios de aire producen pequeñas descargas o *streamers*. En la Figura 3-6 se muestra la relación V/I que decrece de manera exponencial hasta alcanzar el valor mínimo de la misma en el pico de la corriente. Para este primer proceso, se le asigna el nombre de  $Z_D(t)$  a la relación V/I decreciente que se presenta cuando se da inicio a la descarga. Esta relación es expresada en la Ecuación (3.28)





$$\frac{V}{I} = Z_D(t) = Z_o * e^{-\frac{t}{\tau_1}} + Z_{min} \quad (3.28)$$

donde  $Z_o$  es el valor inicial de la relación V/I (antes del inicio de la descarga),  $Z_{min}$  es el valor mínimo de la relación V/I correspondiente al estado final del fenómeno decreciente y  $\tau_1$  es la constante de tiempo que debe ser encontrada por cada condición de humedad y tensión de disrupción aplicada.

### **B. Extinción de la Descarga (Fenómeno Creciente)**

Cuando la corriente ha alcanzado su valor máximo, la relación V/I en ese punto será mínima y la energía disipada estará en su valor más alto. Es ahí donde comienza el segundo proceso o extinción de la descarga. En esta parte del proceso la corriente empieza a decrecer mucho más lento y la relación V/I recupera su valor inicial. Este proceso es expresado a partir de la Ecuación (3.29).

$$Z_c(t) = (Z_o - Z_{min}) \left( 1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau_2}} \right) \left( \frac{K}{I} \right) + Z_{min} \quad (3.29)$$

donde ,  $t_1$  es el tiempo de inicio del proceso de crecimiento (recuperación) de la descarga y es igual al tiempo final de decrecimiento del proceso 1,  $\tau_2$  es la constante de tiempo del proceso 2,  $I$  es la corriente registrada en cada evento disruptivo sobre la muestra de suelo y  $K$  es un factor de ajuste que se debe determinar con cada condición de humedad.

### **3.4. MODELO PROPUESTO POR MOHAMAD ET. AL.**

Este trabajo fue propuesto por Mohamad *et. al.* en 2006 [2]. El modelo desarrollado describe el efecto que tiene la ionización del suelo en el valor de su relación V/I ante la aplicación de impulsos de tensión. El tipo de suelo utilizado en las pruebas experimentales fue arena en una probeta de electrodos coaxiales semiesféricos. En este modelo se observa la existencia de dos resistencias durante los procesos de pre-ionización y post-ionización del suelo.

#### **3.4.1. Proceso de pre-ionización**

El primer valor de relación V/I es definido como *Resistencia de pre-ionización*  $R_1$ , el cual describe el valor lineal de la relación V/I del suelo antes de presentarse la ionización y se caracteriza por ser decreciente ante grandes magnitudes de corriente. Este decrecimiento se debe al inicio de un proceso no lineal de conducción en el suelo húmedo producto de los efectos térmicos en este. Matemáticamente, la relación V/I de pre-ionización puede ser expresada mediante la Ecuación (3.30).



$$R_1(i) = \frac{V_1}{I_{pico_1}} \quad (3.30)$$

donde  $V_1$  corresponde a la tensión presentada en el pico de corriente inicial  $I_{pico_1}$  cuando aún no hay ionización.

### 3.4.2. Proceso de Post-Ionización

Este estado inicia cuando la corriente ha alcanzado su valor máximo y se ha alcanzado el valor mínimo de relación V/I. El segundo valor de relación V/I hallado en este proceso se conoce como *Resistencia de Post-ionización*  $R_2$  y que describe la respuesta no lineal de la relación V/I durante y después de ocurrida la ionización. Este valor también es decreciente, por lo general es menor que  $R_1$  y se puede expresar con la Ecuación (3.31).

$$R_2(i) = \frac{V_2}{I_{pico_2}} \quad (3.31)$$

donde  $V_2$  es la tensión presentada en el segundo pico de corriente  $I_{pico_2}$  y se presenta cuando el suelo se encuentra ionizado.

Además de estas consideraciones, el modelo de Mohamad *et. al.* plantea que en la zona ionizada se incrementará la propagación de los *streamers* desde el electrodo energizado hasta el electrodo externo y que la velocidad de propagación de los *streamers* depende de la tensión aplicada y la conductividad del suelo. Para el análisis matemático de este modelo se asume que la región ionizada se expande uniformemente con una constante de tiempo  $\tau_i$  y que la relación V/I total en función del tiempo decrecerá cuando se inicie la ionización. De esta forma, la relación V/I dinámica de este proceso de conducción está dada por la Ecuación (3.32).

$$R(t) = R_1(i) * \left( \frac{R_2(i)}{R_1(i)} + e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (3.32)$$

donde  $R_1(i)$  es la resistencia de pre-ionización,  $R_2(i)$  es la resistencia de post-ionización y  $\tau_i$  es la constante de tiempo para la propagación de la ionización.



## CAPÍTULO 4. VALIDACIÓN DE MODELOS

En este capítulo se presenta el desarrollo de algoritmos para los modelos previamente seleccionados y su implementación en lenguaje de programación en MATLAB ®. Para llevar a cabo la validación del código implementado, se seleccionaron dos (2)<sup>5</sup> de los cuatro (4) indicadores estadísticos mencionados en este capítulo, que permiten evaluar el funcionamiento del modelo al compararlo con los resultados presentados en las investigaciones hechas por cada autor.

En primer lugar, se realiza una breve descripción matemática de los indicadores estadísticos que se usarán para la comparación. Luego con base en los algoritmos desarrollados para los modelos, se muestra la implementación en código en MATLAB ® obteniendo así la curva de la relación V/I para cada modelo. Finalmente mediante una comparación visual y el análisis estadístico con dos (2) de los indicadores descritos, se lleva a cabo la comparación de los resultados arrojados por los modelos programados y los resultados presentados en la literatura para así asegurar que el código programado en MATLAB ® genera resultados confiables.

### 4.1. INDICADORES ESTADÍSTICOS DE COMPARACIÓN

La selección de los indicadores estadísticos que se usarán tanto para la validación de la programación hecha en MATLAB ® de los modelos como para la comparación entre las señales experimentales y las curvas teóricas, se basó en dos aspectos de comparación importantes: similitud en la magnitud y forma entre las curvas de la relación V/I. De acuerdo a esto, se escogieron cuatro (4) indicadores de los cuales uno (1) calcula el error de magnitud entre curvas (MSPE), dos (2) que calculan la correlación en cuanto a forma de la curva (CCC y rxy) y uno (1) que involucra los dos elementos anteriores mencionados (U). En este inciso se presenta la formulación matemática y una breve descripción de los indicadores.

#### 4.1.1. Porcentaje de Error Medio Cuadrático (MSPE)

Este método calcula el error o corrimiento entre curvas en cuanto a magnitud se refiere. Es la media aritmética de la suma de las diferencias cuadráticas entre valores experimentales y teóricos arrojados por los modelos como se muestra en la Ecuación (4.1). Está expresado en porcentaje y sólo puede ser usada para señales con igual rango temporal. Para comparaciones entre vectores de datos, cuanto menor sea el porcentaje arrojado más adecuado será el modelo teórico.

$$MSPE = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{E[i] - T[i]}{E[i]} \right)^2}{N} * 100 [\%] \quad (4.1)$$

<sup>5</sup> Los indicadores usados para la validación son: Porcentaje de Error Medio Cuadrático (MSPE) y el Coeficiente de Desigualdad de Theil (U).



Donde  $E[i]$  es el dato experimental en la posición  $i$ ,  $T[i]$  es el dato teórico en la posición  $i$  y  $N$  es el número de datos experimentales y teóricos. Adicionalmente, ha sido utilizado como método de validación de modelos para el filtrado de señales parásitas en ondas transmitidas de radio [28].

#### 4.1.2. Coeficiente de Correlación Cruzada (CCC)

Este coeficiente cuantifica el grado de independencia entre dos señales discretas con igual número de datos y mismo rango temporal. La correlación cruzada toma la señal experimental superpuesta con la señal teórica y la moverá  $k$  veces hacia la derecha en un rango amplio de valores. La Ecuación (4.2) muestra el cálculo de Correlación Cruzada  $C(k)$  [29].

$$C(k) = \frac{\sum_{i=1}^N T[i] * E[i + k]}{N} \tag{4.2}$$

Donde  $E[i + k]$  es el corrimiento a la señal experimental en  $k$  intervalos. Sin embargo, para obtener un valor cuantificable a la hora de comparar dos señales se usa el Coeficiente de Correlación Cruzada  $CCC(k)$  como se muestra en la Ecuación (4.3).

$$CCC(k) = \frac{C(k)}{\frac{1}{N} * \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N T[i]^2\right] * \left[\sum_{i=1}^N E[i]^2\right]}} \tag{4.3}$$

Donde  $E[i]$  es el dato experimental en la posición  $i$ ,  $T[i]$  es el dato teórico en la posición  $i$ ,  $C(k)$  es el valor de correlación cruzada en función del intervalo  $k$  y  $N$  es el número de datos experimentales y teóricos. Como se muestra en la Tabla 4-1, el resultado del cálculo de este indicador es un valor entre cero (0) y uno (1), cuanto más cercano el resultado a uno (1), la curva teórica será idéntica a la tomada experimentalmente, mientras que valores cercanos a cero (0), muestra que las formas de las curvas evaluadas difieren entre sí.

Tabla 4-1. Descripción del Coeficiente de Correlación Cruzada.

Valor de $CCC(k)$	Descripción	Análisis del Resultado
0	Las señales son independientes	Curvas con diferente forma geométrica
1	Las señales son producto escalar con tendencia positiva	Curvas con la misma forma geométrica

Este método de comparación se ha usado ampliamente en la predicción para los modelos del comportamiento del clima [30]. Esto se debe a que el coeficiente resultante muestra el grado de igualdad en relación a la forma geométrica entre las curvas experimentales y teóricas.



### 4.1.3. Coeficiente de Correlación de Pearson ( $r_{xy}$ )

Este coeficiente representa la relación lineal entre dos variables discretas sin depender de la escala de las variables. Al igual que la correlación cruzada, mide la dependencia entre dos vectores de datos con el mismo espacio temporal [31]. La Ecuación (4.4) muestra la formulación matemática del coeficiente.

$$r_{xy}(k) = \frac{N * \sum_{i=1}^N T[i] * E[i] - \sum_{i=1}^N T[i] * \sum_{i=1}^N E[i]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N T[i]^2 * (\sum_{i=1}^N T[i])^2 * \sum_{i=1}^N E[i]^2 * (\sum_{i=1}^N E[i])^2}} \quad (4.4)$$

Donde  $E[i]$  es el dato experimental en la posición  $i$ ,  $T[i]$  es el dato teórico en la posición  $i$  y  $N$  es el número de datos experimentales y teóricos. Como se muestra en la Tabla 4-2, al igual que el indicador (CCC), el resultado debe dar un valor entre cero (0) y uno (1), cuanto más cercano el resultado sea a uno (1), la curva teórica será idéntica a la tomada experimentalmente, mientras que valores cercanos a cero (0), muestra que las formas de las curvas evaluadas difieren entre sí.

Tabla 4-2. Descripción del Coeficiente de Pearson.

Valor de $r_{xy}(k)$	Descripción	Análisis del Resultado
0	Las señales son independientes	Curvas con diferente forma geométrica.
1	Las señales son producto escalar con tendencia positiva	Curvas con la misma forma geométrica.

Este indicador también evalúa el grado de igualdad de la forma entre curvas experimentales y teóricas. El coeficiente de correlación de Pearson ha sido usado como método de comparación de mediciones clínicas [32].

### 4.1.4. Coeficiente de Desigualdad de Theil ( $U$ )

Este coeficiente otorga una medida de exactitud de un pronóstico frente a una variación real, evaluando la diferencia de magnitud y forma de las señales [33]. Su formulación matemática se muestra en la Ecuación (4.5).

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N (A[i] - F[i])^2}{\sum_{i=2}^N A[i]^2}} \quad (4.5)$$

Teniendo en cuenta que:

$$A[i] = E[i] - E[i - 1] \text{ (Variación Real)}$$

$$F[i] = T[i] - T[i - 1] \text{ (Variación Prevista)}$$



Y donde  $E[i]$  es el dato experimental en la posición  $i$ ,  $T[i]$  es el dato teórico en la posición  $i$  y  $N$  es el número de datos experimentales y teóricos. Como se muestra en la Tabla 4-3, el resultado del cálculo de este coeficiente es un valor entre cero (0) e infinito positivo. Cuanto más cercano a cero (0) el modelo representa exactamente el comportamiento experimental mientras que por encima de uno (1) el modelo tiene una mala capacidad predictiva.

Tabla 4-3. Descripción del Indicador de Desigualdad de Theil.

Valor de $U$	Descripción	Análisis del Resultado
0	Son perfectamente iguales	El modelo representa de manera perfecta lo obtenido en la experimentación
$0 < U < 1$	Aceptables	El modelo representa de buena manera el comportamiento físico
1	<i>Statu Quo</i>	El resultado es regular. Representa las curvas pero con un error muy alto
$U > 1$	El modelo tiene mala capacidad predictiva	El modelo no es capaz de representar el comportamiento observado

La ventaja de usar este método estadístico es que el resultado muestra si un modelo teórico es exacto o no, con cierto grado de error cuantificable. Por otro lado este indicador se ha usado ampliamente para validar modelos de proyección de variables macro econométricas en países como Uruguay [34].

#### 4.2. CRITERIO PARA LA EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA VALIDACIÓN

Con el fin de definir un criterio de evaluación para validar el código de programación implementado en MATLAB ® a partir de los algoritmos desarrollados, se seleccionaron para validar los modelos en esta sección dos (2) de los indicadores descritos anteriormente. El primer indicador es el MSPE donde se encuentra el error en porcentaje [%] que hay entre la magnitud de datos de las curvas evaluadas. El segundo indicador  $U$  compara la cercanía de los datos que hay punto a punto y la similitud de la forma entre las curvas.

De acuerdo al trabajo realizado por [35], un indicador MSPE no mayor al 10% presenta buenos resultados y confiabilidad en la comparación entre curvas. Sin embargo, debido a que es necesario verificar que los resultados sean muy cercanos, se decidió que para el porcentaje de error MSPE el resultado no puede sobrepasar el 3% y para el coeficiente  $U$  debe ser menor a 0.5. Obteniendo estos resultados para los indicadores, se asegura que los códigos de programación en MATLAB ® de cada modelo cumplen con lo requerido para arrojar resultados confiables, y por lo tanto pueden ser usados para la herramienta computacional, y posterior análisis comparativo entre los resultados teóricos (modelos) y la relación  $V/I$  obtenida a partir de las señales de tensión y corriente de las pruebas experimentales que se llevaron a cabo para este proyecto de grado.



### 4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS UTILIZADOS

En esta sección del documento, se presentan las variables de entrada de los modelos, los algoritmos que los describen y la validación tanto visual, como matemática, mediante los indicadores estadísticos. Para obtener un resultado fiable, se tomaron los valores de magnitud en el tiempo de las curvas V/I calculadas por cada uno de los autores, extrayendo los valores punto a punto sobre las curvas directamente de las gráficas mostradas en cada una de las publicaciones. A partir de esto, se obtuvieron los valores digitalizados de las curvas de los modelos, para compararlas con las curvas arrojadas por los algoritmos y comprobar el correcto funcionamiento de la programación.

#### 4.3.1. Entradas y Salidas de los Modelos

La Tabla 4-4 muestra todas las variables de entrada para los modelos teóricos. En esta se puede observar elementos eléctricos, térmicos y geométricos de la configuración coaxial.

Tabla 4-4. Variables de Entrada de los Modelos Teóricos.

Modelo\Variable	V	I	$R_o, Z_o$	$R_1$	$r_o$	$r_{ext}$	L	$\tau_1$	$\tau_2$	$t_{11}$	$t_{c1}, t_1$	$t_{c2}, t_2$	$\mu_r$	$\epsilon_r$	f	$V_b$	$T_a$	CH	K
Liew & Darveniza	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X				X			
Pineda No.1	X	X	X		X	X	X						X	X	X				
Pineda No.2	X	X	X							X	X	X							X
Mohamad <i>et. al.</i>	X	X		X				X											
Cooray <i>et. al.</i>	X	X	X		X	X	X									X	X	X	

Donde:

- V e I son los vectores de voltaje y corriente obtenidos de las señales experimentales
- $R_o$  y  $Z_o$  son el valor inicial de la relación V/I antes de presentarse la descarga
- $R_1$  es el valor de la relación V/I en el primer pico de corriente
- $r_o$  es el radio de la varilla enterrada o electrodo interior
- $r_{ext}$  es el radio del electrodo exterior
- L es la longitud de enterramiento del electrodo interior
- $\tau_1$  es el tiempo constante en que tarda en empezar el proceso de ionización constante
- $\tau_2$  es el tiempo contante en que tarda en empezar el proceso de recuperación
- $t_{c1}$  y  $t_1$  son el tiempo de inicio de la descarga
- $t_{c2}$  y  $t_2$  son el tiempo de inicio de la recuperación
- $\mu_r$  es la permeabilidad magnética relativa del suelo
- $\epsilon_r$  es la permitividad eléctrica relativa del suelo
- f es la frecuencia asociada al impulso de tensión
- $V_b$  es el valor de tensión cuando se inicia la descarga
- $T_a$  es la temperatura ambiente durante las pruebas experimentales



- $CH$  es el porcentaje de humedad en la prueba experimental
- $K$  es la constante de ajuste para los modelos

Como se puede observar en la Tabla 4-4 algunos de los parámetros iniciales importantes para todos los modelos son obtenidos de manera experimental ( $V$ ,  $I$ ,  $R_o$ ,  $Z_o$  y  $R_1$ ). Sólo el modelo de Cooray *et. al.* implica variables térmicas y de variación de la energía; por otro lado el primer modelo analítico de Pineda tiene en cuenta la frecuencia asociada al impulso aplicado al suelo y algunas características electromagnéticas del suelo.

#### 4.4. ESTRUCTURA DE LOS ALGORITMOS

En el ANEXO A de este libro se ilustran los algoritmos desarrollados para los modelos físicos descritos en este libro, donde se presenta paso a paso el cálculo matemático propuesto por los autores en sus investigaciones para hallar la curva de la relación  $V/I$  del suelo en estado de disrupción.

#### 4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO DE LIEW & DARVENIZA

En la Tabla 4-5 se pueden apreciar los parámetros de entrada que deben ser ingresados para llevar a cabo el cálculo de la relación  $V/I$  del suelo en el código hecho en MATLAB®, estos datos son los mismos usados por Liew & Darveniza en su trabajo [6].

Tabla 4-5. Parámetros iniciales para el modelo de Liew & Darveniza [6].

Parámetro	Valor
$\rho_o [\Omega * m]$	5000
$\tau_1 [\mu s]$	2
$\tau_2 [\mu s]$	4.5
$r_o [m]$	0.0635
$E_c [kV/m]$	1.1
$L [m]$	0.61
$t_{c1} [\mu s]$	0.25
$t_{c2} [\mu s]$	7.2

La Figura 4-1(a)) muestra el impulso de corriente usado del código en MATLAB® de este modelo. Como se observa, la onda tiene un tiempo de frente de aproximadamente  $4.8\mu s$ , un tiempo de cola aproximadamente  $15\mu s$  y una magnitud de  $13\text{ kA}$ . Por otro lado, la Figura 4-1(b)) ilustra el impulso resultante de tensión usado de igual manera para la validación. Como se observa, tiene un tiempo de frente de aproximadamente  $2\mu s$ , un tiempo de cola aproximadamente  $14\mu s$  y una magnitud de  $200\text{ kV}$ .



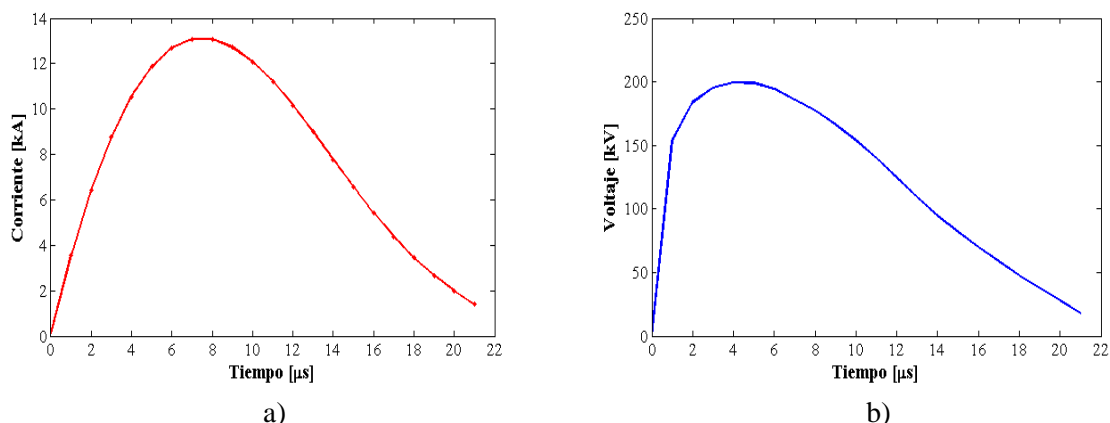


Figura 4-1 Curvas usadas por Liew & Darveniza para el modelo. a) Impulso de corriente; b) Impulso de tensión. Fuente [6].

Al ingresar los parámetros mostrados en la Tabla 4-5 y la curva de corriente de la Figura 4-1(a) en datos discretos al algoritmo, se obtiene visualmente el resultado de la Figura 4-2. En ella se muestran superpuestas tanto la curva calculada por MATLAB® como la curva mostrada por los autores en su trabajo [6]. Se observa que desde el inicio de la descarga hasta aproximadamente los 2 μs ambas curvas muestran una pequeña diferencia, luego de este instante de tiempo y cerca de los 10 μs donde se inicia la recuperación, las curvas muestran un comportamiento idéntico. A partir de los 10 μs y hasta el final de la región de recuperación cerca de los 19 μs, se puede ver que la curva calculada por MATLAB® tiene una recuperación un poco más rápida respecto a la curva mostrada en el trabajo de los autores.

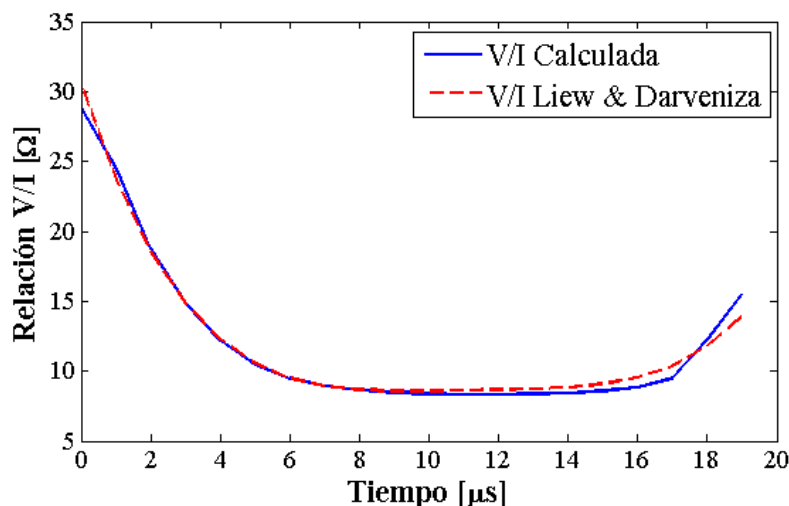


Figura 4-2. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB® y la mostrada por Liew & Darveniza. Fuente [6].

Para realizar la validación de la curva obtenida del modelo al ser programado en MATLAB®, se aplicaron dos (2) de los indicadores estadísticos descritos en la sección 4.1, con el fin de llevar a cabo un análisis comparativo entre la curva calculada en MATLAB® y la curva presentada en la



literatura. Los indicadores seleccionados son el MSPE y el U cuyos valores para este caso son 0.209% y 0.3033, respectivamente. De acuerdo a estos resultados se puede concluir que el porcentaje de error está por debajo del 1%, lo que indica que los datos punto a punto de ambas curvas son casi idénticos. Por otro lado, respecto al indicador de desigualdad de Thiel (U), el valor obtenido se encuentra entre cero (0) y uno (1), lo que demuestra que el modelo programado es capaz de representar muy bien el comportamiento que tiene la curva extraída de la literatura.

De la comparación visual y estadística, se puede determinar que a pesar de que las curvas presentan ciertas diferencias, el algoritmo desarrollado para el modelo de Liew & Darveniza cumple con los requerimientos necesarios para la obtención de resultados confiables. Estas diferencias entre las curvas pueden deberse a errores en la extracción de la curva punto a punto de la literatura.

#### 4.6. VALIDACION DE LOS MODELOS PROPUESTOS POR PINEDA

A diferencia del modelo de Liew & Darveniza donde las pruebas experimentales se realizaron con impulsos de corriente, las pruebas desarrolladas por Pineda en su investigación se llevaron a cabo con impulsos de tensión y en un arreglo coaxial. La Figura 4-3(a) muestra el impulso de tensión usado para la validación, donde se observa un tiempo de frente aproximadamente menor a 1  $\mu\text{s}$ , un tiempo de cola aproximadamente 10  $\mu\text{s}$  y una magnitud de 40 kV.

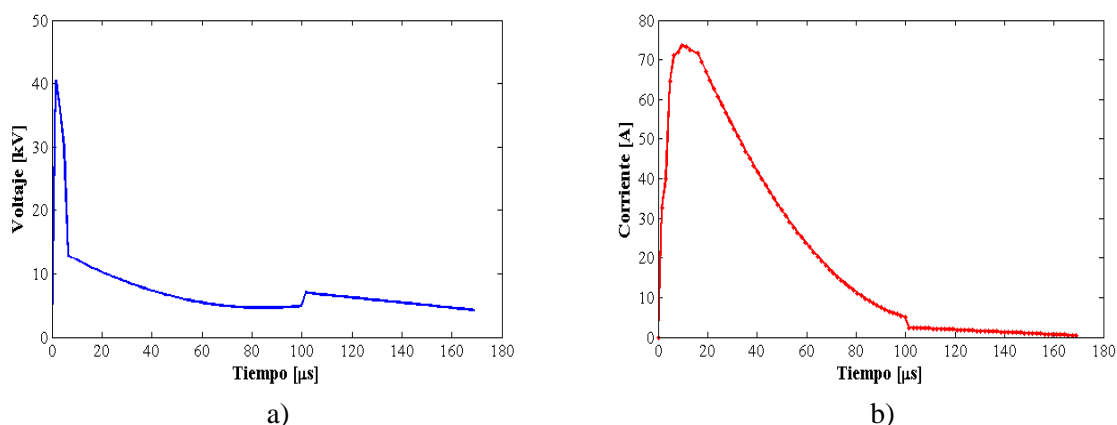


Figura 4-3. Curvas usadas por Pineda para los dos (2) modelos analíticos. a) Impulso de tensión; b) Impulso de corriente. Fuente [7].

La Figura 4-3(b) muestra el impulso de corriente resultante al inyectar el impulso de tensión mostrado anteriormente. Como se observa, esta onda de corriente tiene un tiempo de frente aproximadamente 3  $\mu\text{s}$ , un tiempo de cola aproximadamente 50  $\mu\text{s}$  y una magnitud de 73 A. La onda de corriente resultante, se usó para obtener los resultados de los dos modelos desarrollados por Pineda.



### 4.6.1. Primer Modelo Analítico de Pineda

En Tabla 4-6 se puede ver los parámetros de entrada que deben ser ingresados para llevar a cabo el cálculo de la relación V/I del suelo, en el código hecho en MATLAB®, estos datos son los mismos usados por Pineda en su trabajo para este modelo [7].

Tabla 4-6. Parámetros iniciales para el primer modelo analítico de Pineda [7].

Parámetro	Valor
$\rho_o [\Omega * m]$	2500
$r_o [m]$	0.0048
$r_{ext} [m]$	0.127
$f [kHz]$	500
$L [m]$	0.7
$t_1 [\mu s]$	27
$t_2 [\mu s]$	75

Al ingresar los parámetros mostrados en la Tabla 4-6 y la curva de tensión de la Figura 4-3(a) en datos discretos al algoritmo, se obtiene visualmente el resultado de la Figura 4-4. De esta Figura se puede observar que durante toda la región de descarga (entre 0  $\mu s$  y 26  $\mu s$ ), y gran parte de la región de recuperación (entre 26  $\mu s$  y 74  $\mu s$ ), la curva producto de la programación en MATLAB® y la extraída del trabajo de Pineda [7] son idénticas presentando el mismo comportamiento. A partir de los 74  $\mu s$  en adelante las curvas difieren una de otra, siendo mucho más notable cerca de los 95  $\mu s$ .

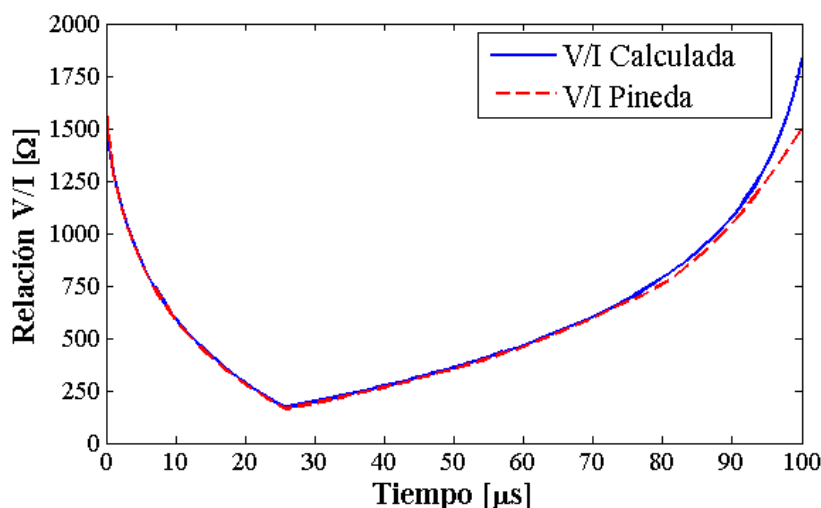


Figura 4-4. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB® y la mostrada por Pineda para el primer modelo analítico. Fuente [7].

Aplicando los mismos indicadores estadísticos usados para el modelo de Liew & Darveniza (MSPE y U), se obtienen los valores de 0.120% y 0.3018, respectivamente. De estos resultados se puede ver que el MSPE está por debajo del 1% de error y que el indicador U proporcionó un resultado



excelente, por debajo de 0.5. Lo cual indica que el algoritmo diseñado representa con muy buenos resultados el fenómeno de ionización del suelo, y en este caso en particular, reproduce eficazmente la curva extraída de la investigación hecha por el autor.

#### 4.6.2. Segundo Modelo Analítico de Pineda

En la Tabla 4-7 se puede observar los datos de entrada requeridos para hallar la curva de la relación V/I del suelo, en el código hecho en MATLAB®, estos datos son los mismos usados por Pineda en su trabajo para este modelo [7].

Tabla 4-7. Parámetros Iniciales para el segundo modelo analítico de Pineda [7].

Parámetro	Valor
$Z_o$ [ $\Omega$ ]	700
$\tau_1$ [ $\mu$ s]	4.5
$\tau_{11}$ [ $\mu$ s]	30
$\tau_2$ [ $\mu$ s]	38
$K$	6

Al ingresar los parámetros mostrados en la Tabla 4-7 y la curva de corriente de la Figura 4-3 (b)) en datos discretos al algoritmo, se obtiene visualmente el resultado de la Figura 4-5. De esta Figura se puede observar tanto la curva calculada por MATLAB® como la curva mostrada en los resultados por el autor en su trabajo. Es notable que a lo largo del fenómeno de disrupción en el suelo, las curvas de la relación V/I tienen tramos en los que se diferencian una a otra. En la región de descarga cerca de los 2  $\mu$ s hasta los 11  $\mu$ s, existe una pequeña disimilitud, sin embargo, las más destacadas disimilitudes se encuentran desde los 34  $\mu$ s en adelante, lo que puede deberse a errores en la duplicación de la cuadrícula obtenida de los datos proporcionados por el autor en su investigación.

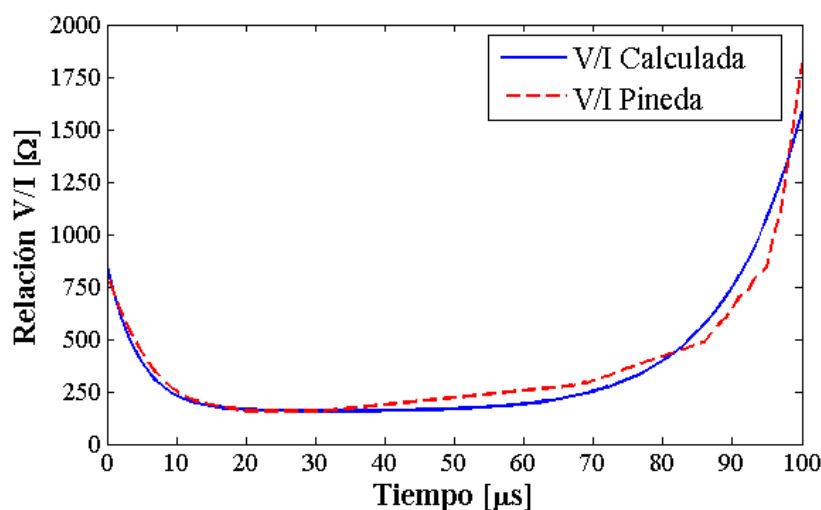


Figura 4-5. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Pineda para el segundo modelo analítico. Fuente [7].

Estimando los indicadores estadísticos seleccionados, para el MSPE se obtiene un valor de 2.264% y para U un valor de 0.4977. Pese a que estos valores son un poco mayores a los modelos analizados anteriormente, se puede ver que el indicador de error (MSPE) no es tan significativo y el indicador de desigualdad (U) indica que el algoritmo reproduce de manera muy cercana el comportamiento de la curva extraída de la investigación de Pineda [7].

#### 4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO DE MOHAMAD *ET. AL.*

Este modelo requiere la menor cantidad de variables de entrada (en total dos) en comparación con los demás. Sin embargo, el modelo se aproxima bastante en la región de descarga del suelo, pero tiene deficiencias al simular el comportamiento del suelo en disrupción en la región de recuperación de la relación V/I. Adicionalmente, este modelo al no depender de la geometría de los electrodos, se puede aplicar directamente sobre cualquier configuración coaxial.

En la Tabla 4-8 se puede ver los parámetros de entrada que deben ser ingresados para llevar a cabo el cálculo de la relación V/I del suelo, en el código hecho en MATLAB ®, estos datos son los mismos usados por Mohamad *et. al.* en su trabajo [2].

Tabla 4-8. Parámetros iniciales para el modelo de Mohamad *et. A* [2].

Parámetro	Valor
$\tau_i$ [ $\mu$ s]	20
$R_1$ [ $\Omega$ ]	1750
$R_2$ [ $\Omega$ ]	885



La Figura 4-6(a)) muestra el impulso de corriente usado para la validación que a diferencia de los modelos anteriormente mencionados, se obtuvo de manera teórica. Como se observa, tiene un tiempo de frente de aproximadamente  $25 \mu\text{s}$ , un tiempo de cola aproximadamente mayor a  $200 \mu\text{s}$  y una magnitud de  $27 \text{ A}$ . En la Figura 4-6(b)) se observa el impulso resultante de tensión usado de igual manera para la validación. Como se observa, tiene un tiempo de frente de aproximadamente menor a  $1 \mu\text{s}$ , un tiempo de cola aproximadamente mayor a  $200 \mu\text{s}$  y una magnitud de  $26 \text{ kV}$ .

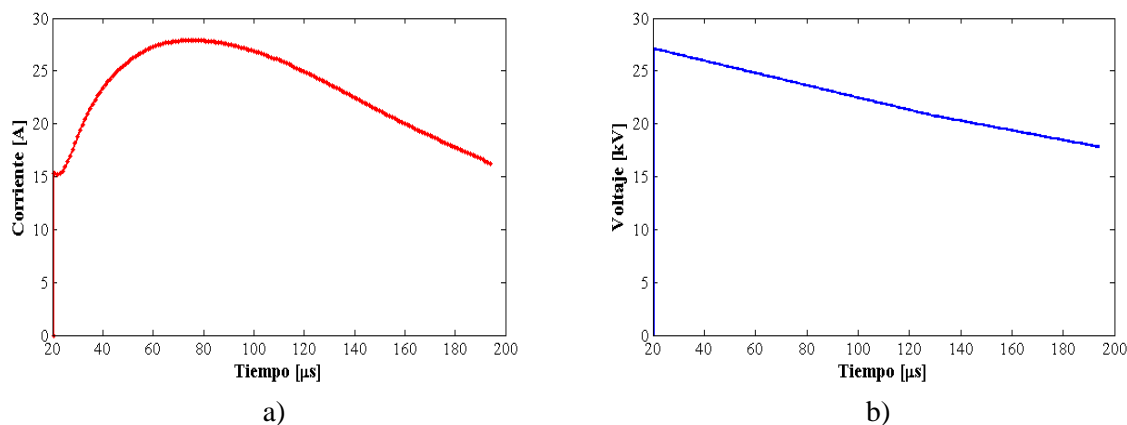


Figura 4-6. Curvas usadas por Mohamad *et. al.* para el modelo. a) Impulso de tensión; b) Impulso de corriente. Fuente [2].

Al ingresar los parámetros mostrados en la Tabla 4-8 y la curva de corriente de la Figura 4-6(a)) en datos discretos al algoritmo, se obtiene visualmente el resultado de la Figura 4-7. En ella se muestra la curva arrojada por la programación en MATLAB ® y la curva extraída del trabajo mostrado por el autor en [2]. Se observa que desde el instante de inicio de la descarga y hasta los  $48 \mu\text{s}$  aproximadamente hay una diferencia mínima casi inapreciable entre ambas curvas. A partir de este momento y hasta finalizar (hasta los  $200 \mu\text{s}$ ) las curvas son idénticas.

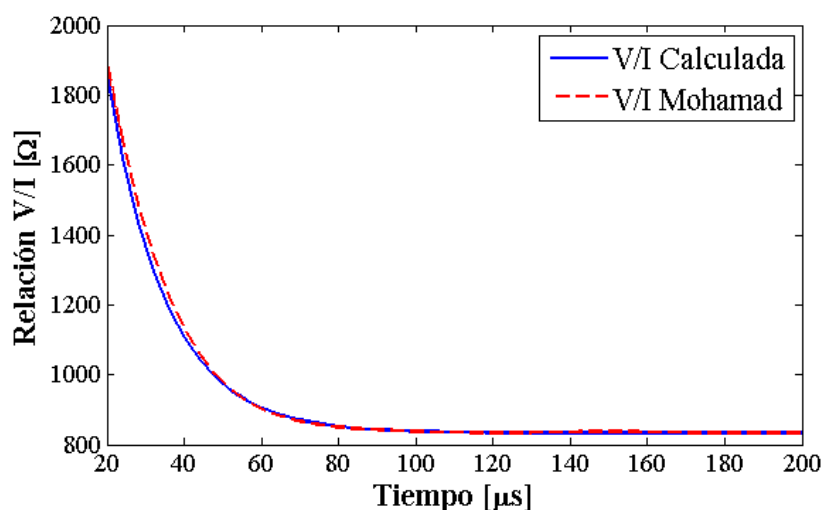


Figura 4-7. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB® y la mostrada por Mohamad *et. al.* Fuente [2].

Estimando los indicadores MSPE y U se obtienen los valores de 0.012% y 0.0674, respectivamente. Como se puede ver ambos indicadores son muy cercanos a cero (0), lo que significa que el algoritmo diseñado para la programación en MATLAB® de este modelo, presenta resultados muy cercanos a la curva obtenida por el autor en sus resultados, por lo que su validación queda demostrada y se puede concluir que la programación de este modelo reproduce resultados confiables.

#### 4.8. VALIDACIÓN DEL MODELO DE COORAY *ET. AL.*

Este modelo contempla tanto el fenómeno térmico como el eléctrico para explicar el comportamiento del suelo bajo la influencia de ionización. Tiene en cuenta el contenido de agua presente en el suelo y la fracción de los espacios de aire que contiene el suelo respecto a su volumen total. En esta sección se muestran las variables de entrada y salida.

En la Tabla 4-9 se pueden apreciar los parámetros de entrada que deben ser ingresados para llevar a cabo el cálculo de la relación V/I del suelo, en el código hecho en MATLAB®, estos datos son los mismos usados por Cooray *et. al.* en su trabajo [15].

Tabla 4-9. Parámetros iniciales para el modelo de Cooray *et. al* [15].

Parámetro	Valor
$L$ [m]	3.05
$r_o$ [m]	0.0127
$\sigma_s$ [S/m]	1.15 E -02
$E_c$ [kV/m]	127
$T_a$ [K]	298.15



Parámetro	Valor
$T_o$ [K]	3600
$F$	0.005
$C_p$ [J/(K * kg)]	1004.67
$S$ [J/(K * m <sup>3</sup> )]	4.86 E -03

La Figura 4-8 muestra el impulso de corriente usado por Cooray et al, a diferencia de los otros modelos, este autor solo utiliza la onda de corriente para sus cálculos. Como se observa, tiene un tiempo de frente de aproximadamente 12  $\mu$ s, un tiempo de cola aproximadamente mayor a 33  $\mu$ s y una magnitud de 13 kA.

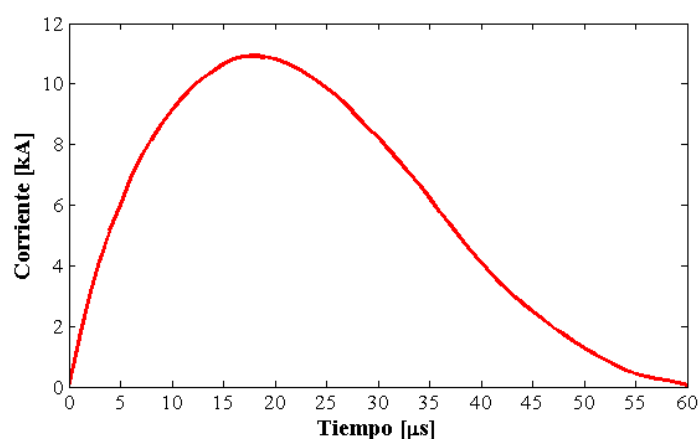


Figura 4-8. Impulso de Corriente usado por Cooray *et. al.* para el modelo.  
Fuente [15].

Al ingresar los parámetros mostrados en la Tabla 4-9 y la curva de corriente de la Figura 4-8 en datos discretos al algoritmo, se obtiene visualmente el resultado de la Figura 4-9. En ella se observan solapadas tanto la curva calculada por MATLAB® como la curva mostrada por los autores en su trabajo [15]. Se puede apreciar que desde el inicio de la descarga hasta cerca de los 12  $\mu$ s y desde los 41  $\mu$ s hasta finalizar existen pequeñas diferencias, no obstante, desde los 12  $\mu$ s hasta los 32  $\mu$ s en la región donde la relación V/I llega a su valor mínimo, sí hay una diferencia más notable. Esto se debe al uso de dos  $dr$  que se muestran en el algoritmo: un  $dr_1$  para la descarga y otro  $dr_2$  para la recuperación.



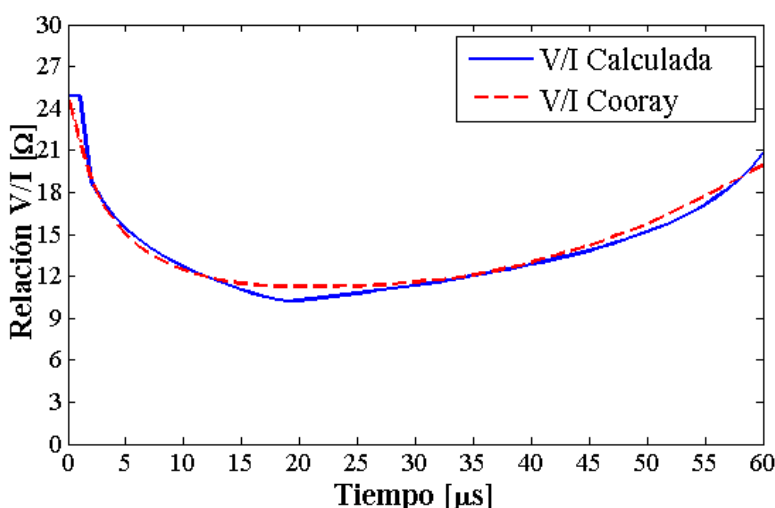


Figura 4-9. Comparación de la curva de la relación V/I obtenida en MATLAB ® y la mostrada por Cooray *et. al.* Fuente [15].

A pesar de observar diferencias entre las curvas, al calcular los indicadores estadísticos se obtiene para el MSPE un valor de 0.17% y para el U un valor de 0.4432, valores que se encuentran dentro del rango establecido para llevar a cabo la validación del algoritmo del modelo y lo que demuestra que el diseño del algoritmo es capaz de reproducir de muy buena forma la respuesta no lineal del suelo cuando éste se encuentra ionizado.

En la Tabla 4-10 se muestra el resumen de resultados estadísticos obtenidos para los cinco (5) modelos. De esta se puede concluir que todos los modelos cumplen con los criterios de evaluación definidos ( $MSPE \leq 3\%$  y  $U \leq 0.5$ ), y por lo tanto los códigos hechos en MATLAB ® representan fielmente los resultados mostrados por los autores en cada uno de sus trabajos. En concordancia con los resultados, estos códigos de programación pueden ser utilizados en la herramienta computacional, para llevar a cabo la comparación entre los resultados obtenidos de cada modelo y la curva de la relación V/I adquirida de forma experimental.

Tabla 4-10. Resultados para los indicadores estadísticos evaluados.

Modelo\Coeficiente	MSPE	U
Liew & Darveniza	0.209%	0.3033
Pineda No.1	0.120%	0.3018
Pineda No.2	2.264%	0.4977
Mohamad <i>et. al.</i>	0.012%	0.0674
Cooray <i>et. al.</i>	0.172%	0.4432



# CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

---

En este capítulo se muestra una breve descripción de la herramienta computacional desarrollada en código de MATLAB® a partir de los algoritmos mostrados en el Anexo A de este documento. Con la ayuda de esta herramienta se mejora el procesamiento de datos para la comparación de los modelos de la relación V/I expuestos en este trabajo de grado. Adicionalmente, se presenta el análisis de sensibilidad para los modelos que dependen de parámetros geométricos para sus datos de entrada. En este análisis de sensibilidad se cambiarán el radio y profundidad de enterramiento del electrodo central, con el fin de evaluar el comportamiento de la curva resultante de la relación V/I ante dichos cambios.

## 5.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

*Lightning Soil Pro VI.0* es una herramienta computacional basada en el desarrollo de algoritmos y cálculos matemáticos necesarios para la aplicación de los modelos físicos que describen la respuesta no lineal de la relación V/I del suelo bajo la influencia de ionización. Esta herramienta es desarrollada en el lenguaje de programación del software MATLAB®, todas las funciones y líneas de código son desarrolladas por sus autores. El uso del lenguaje de programación en MATLAB® facilita al usuario realizar las siguientes acciones:

- La importación de los datos de las señales de tensión y corriente experimentales desde un formato compatible con Microsoft Excel
- El ingreso de los datos de entrada necesarios para la aplicación de los modelos
- La graficación de la curva de la relación V/I no lineal del suelo resultante de cada modelo y la curva experimental
- El cálculo de indicadores estadísticos cuantitativos y cualitativos producto de la comparación entre la curva experimental y teórica

La herramienta computacional *Lightning Soil Pro VI.0* está compuesta por cuatro (4) funciones principales que son las encargadas de realizar los cálculos matemáticos propios de cada modelo, y de funciones adicionales que realizan diferentes tareas, lo que en conjunto hacen que la herramienta computacional *Lightning Soil Pro VI.0* sea amigable y de fácil uso para el usuario.

## 5.2. ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ GRÁFICA

La herramienta computacional *Lightning Soil Pro VI.0* cuenta con una interfaz gráfica principal que comprende de las diferentes áreas de trabajo mostradas en la Figura 5-1.

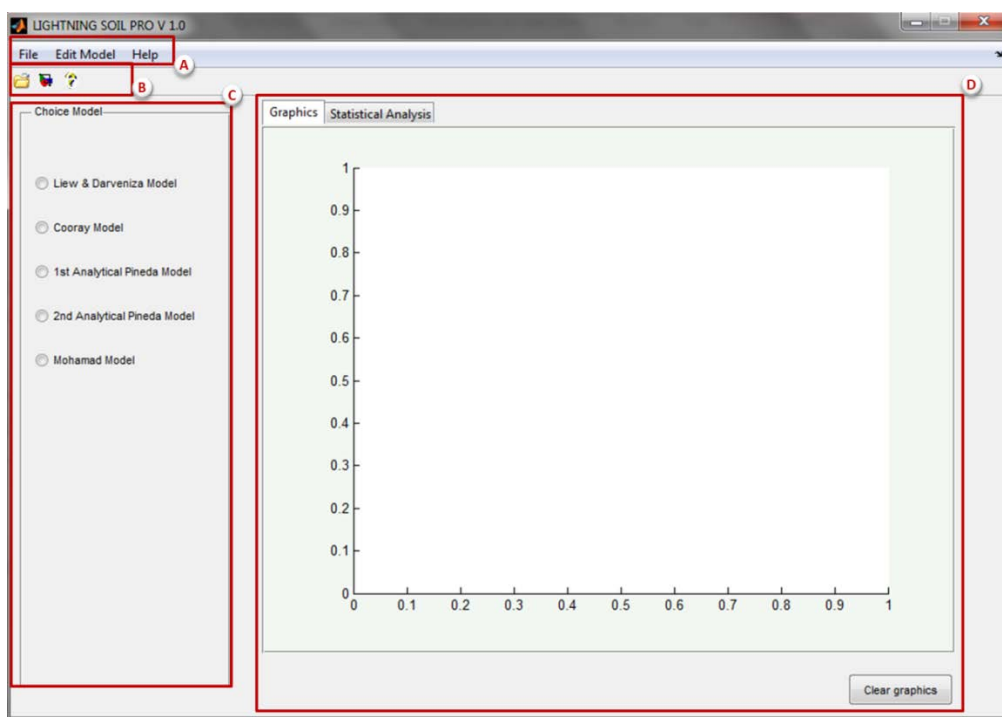


Figura 5-1. Ventana Principal de Lightning Soil Pro V1.0.

Fuente Autores.

En la Tabla 5-1 se muestra la descripción de las funciones que desempeñan las áreas de trabajo mostradas en la Figura 5-1. Ventana Principal de Lightning Soil Pro V1.0.

Fuente Autores.

Tabla 5-1. Descripción de las áreas de trabajo de la ventana principal.

Áreas de Trabajo		Función
ID	Nombre	
A	Barra de Herramientas	Esta área de trabajo contiene los comandos principales que son usados frecuentemente, entre ellos, Datos de Entrada, Importación y Exportación de datos, etc.
B	Barra de Opciones	En esta área se reúnen los comandos para la graficación de los datos, los cuales se ven reflejados en el área D.
C	Selección de Modelo (Choice Model)	Esta área permite seleccionar los diferentes modelos, lo cual modificará la visualización de los datos en el área D, lo que facilita la interacción del usuario con los resultados.
D	Panel de Visualización	En esta área se visualizan las gráficas seleccionadas y los resultados de los indicadores estadísticos de forma cuantitativa y cualitativa.

La descripción detallada de cada función y los diferentes comandos que hacen parte de la interfaz gráfica de la herramienta computacional *Lightning Soil Pro V1.0* se presenta en el Manual de usuario que hace parte del ANEXO C de este documento.



### 5.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS MODELOS FÍSICOS

En esta sección se presenta el análisis de sensibilidad con el fin de observar el comportamiento de los modelos físicos al variar la profundidad de enterramiento del electrodo central y el radio del mismo. Para ello, se seleccionaron diez (10) valores de profundidad de enterramiento desde 1 cm hasta 35 cm y diez (10) magnitudes de radio de electrodos centrales de puesta a tierra comerciales desde 0.05mm a 0.927cm los cuales se muestran en la Tabla 5-2.

El resultado arrojado al ingresar estos datos a la herramienta computacional se comparará con los obtenidos de las pruebas experimentales detallando la forma de las curvas, el comportamiento de los modelos físicos y los tiempos de descarga y recuperación con respecto a la variación de los parámetros mencionados.

Tabla 5-2. Datos de profundidad de enterramiento y radio del electrodo central para el análisis de sensibilidad.

Nº	Profundidad de Enterramiento [m]	Radio del Electrodo [m]
1	0.017	5.10E-05
2	0.071	2.36E-03
3	0.111	3.51E-03
4	0.145	4.66E-03
5	0.187	5.81E-03
6	0.212	6.97E-03
7	0.245	8.12E-03
8	0.283	9.28E-03
9	0.317	1.04E-02
10	0.350	1.16E-02

Para observar el efecto de la variación de los dos parámetros anteriormente descritos, se tomó solamente el caso experimental N° ocho (8) como referencia en el que los datos ingresados a la herramienta de tiempo, temperatura y relación V/I inicial permanecieron constantes. Como primer análisis, para todos los modelos el radio del electrodo central también permaneció constante mientras que el valor de profundidad fue variable como se muestra en la Tabla 5-2. De ello se obtuvieron diez (10) curvas teórica de la relación V/I que se solaparon y compararon con las curvas obtenidas experimentalmente al variar la profundidad.

En el segundo análisis, el dato variable es el radio del electrodo central mientras que la profundidad de enterramiento ahora es constante; de este proceso también se obtuvieron diez (10) curvas de relación V/I solapadas. Adicionalmente, se describió en detalle el comportamiento de la relación V/I por modelo teniendo en cuenta el tiempo y las variaciones anteriormente mencionadas.



### 5.3.1. Análisis para el modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza

Usando el código implementado en MATLAB® y mencionado en el capítulo 4, en primer lugar se mantuvo variable el valor de la profundidad de enterramiento del electrodo central, mientras el valor del radio se conservó constante. Luego, el dato variable fue el radio del electrodo central mientras el valor de profundidad permaneció ahora constante.

Para ambos casos se obtuvieron las curvas de la relación V/I del suelo para cada valor de profundidad y radio mostrado en la Tabla 5-2, los datos resultantes se registraron en un archivo de Microsoft Excel® los cuales se encuentran en el Anexo de forma digital. Respecto a la variación de la profundidad, la Figura 5-2 muestra las diferentes curvas de la relación V/I del suelo resultantes al ingresar como dato de entrada los valores de profundidad de enterramiento seleccionados.

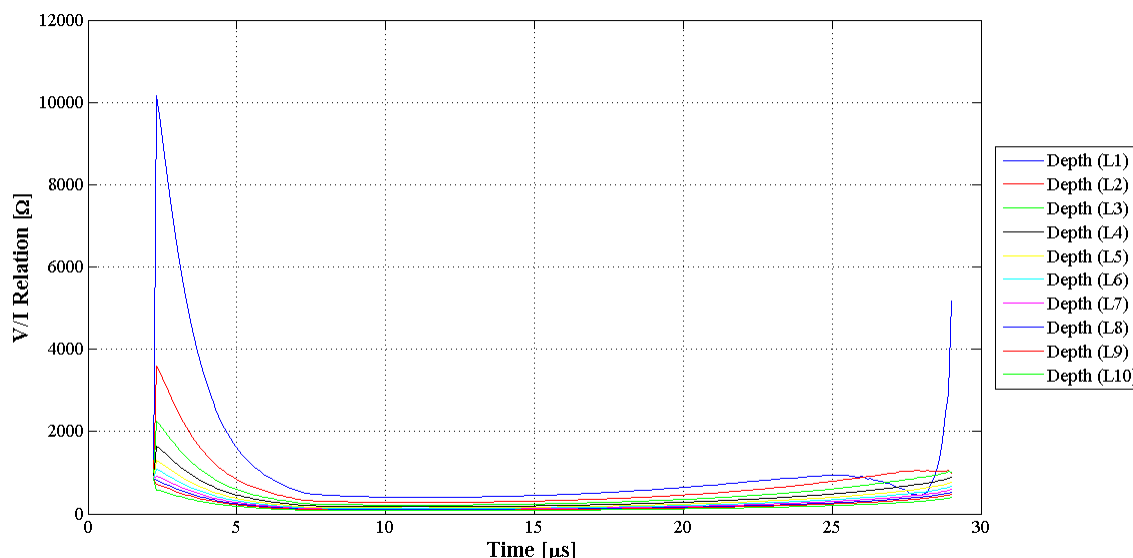


Figura 5-2. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el modelo de Liew & Darveniza. Fuente autores.

Como se puede observar, al variar la profundidad de enterramiento del electrodo central el valor de la relación V/I disminuye entre los 800 Ω y los 50 Ω. Para las profundidades más pequeñas, el valor inicial de la relación V/I alcanza los 10000 Ω, 3500 Ω y 2200 Ω lo que implica que a medida que la profundidad de enterramiento está más cerca de la superficie, la relación V/I inicial es mayor. El tiempo de duración de la descarga es mucho más lento para las menores profundidades a pesar de que las curvas caen más rápido en el proceso. Para los 0.017 m el tiempo de duración de la descarga es aproximadamente 9 μs mientras que para los 0.35 m es aproximadamente 6 μs.

En cuanto a la región de recuperación de la curva, se observó que para las menores profundidades el ascenso de la relación V/I es mucho más rápido y disminuye con el aumento de la profundidad. A



su vez, el valor en magnitud final de la relación disminuye cada vez que se hace más profunda la longitud  $L$ .

En el siguiente caso se realizó la variación del radio desde  $5.10E-05$  m hasta los  $1.16E-02$  m. La Figura 5-3 muestra el cambio de la relación  $V/I$  con respecto a esta variación y el tiempo de duración de la señal. Como se aprecia, el tiempo de duración de la descarga es de  $9 \mu s$ , valor similar para todos los casos, a pesar de que para los menores radios se observa una caída más rápida. Sin embargo, la duración de la recuperación es mucho más lenta para los radios más grandes y aumenta con la disminución del radio. En el caso de la relación  $V/I$  inicial y final, se ve que disminuye con el aumento del radio del electrodo mientras que el valor mínimo es el mismo para todos los casos.

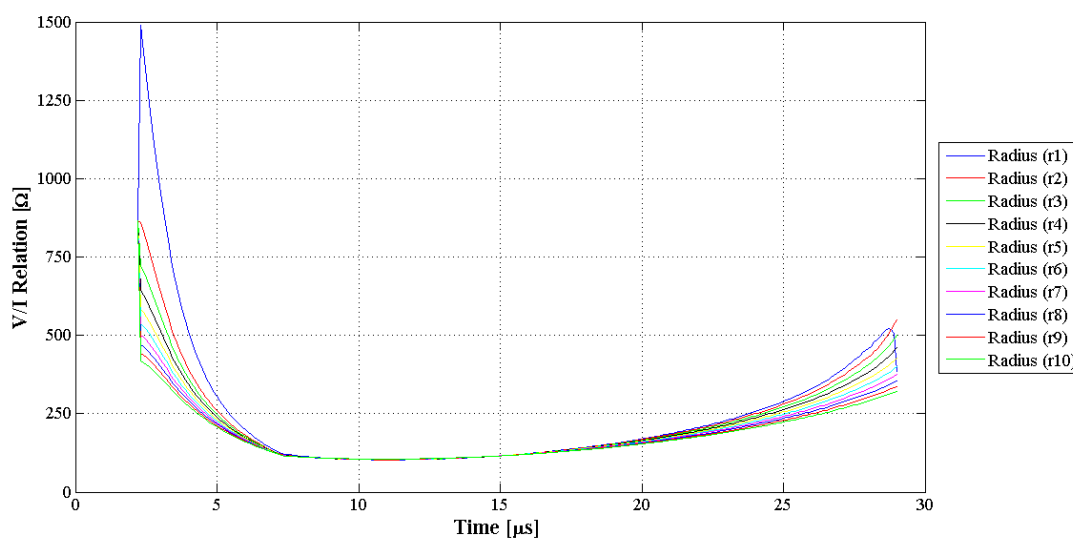


Figura 5-3. Variación de la relación  $V/I$  con respecto al cambio del radio del electrodo central para el modelo de Liew & Darveniza. Fuente autores.

### 5.3.2. Análisis para el modelo Físico-Térmico propuesto por Cooray *et. al.*

Como primer resultado, la Figura 5-4 muestra las diferentes curvas de relación  $V/I$  al variar la profundidad de enterramiento del electrodo central.

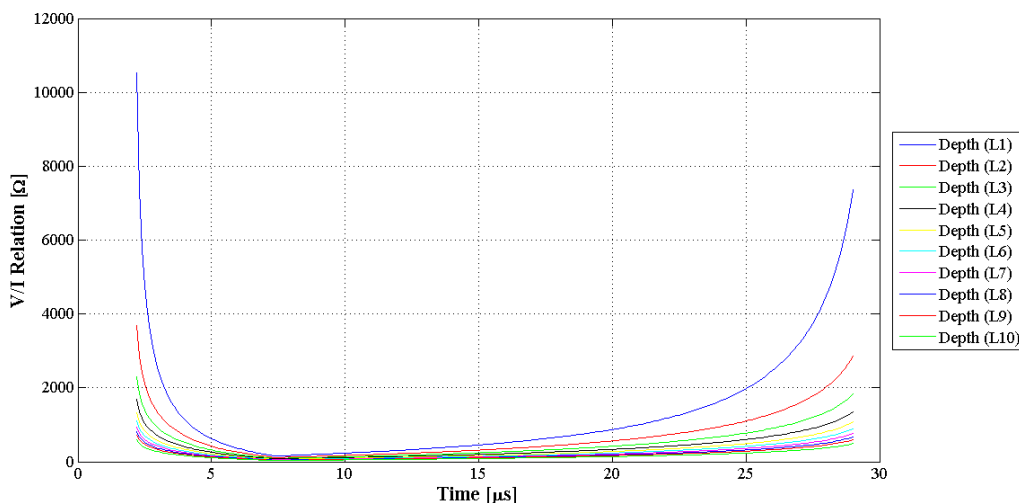


Figura 5-4. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el modelo de Cooray *et. al.* Fuente autores.

Como se puede observar, al variar la profundidad de enterramiento del electrodo central el valor de la relación V/I disminuye entre los 200  $\Omega$  y los 50  $\Omega$ . Para las profundidades más pequeñas  $L$ , el valor inicial de la relación V/I alcanza los 10000  $\Omega$ , 3900  $\Omega$  y 2100  $\Omega$ , de lo cual se observa que al igual que el modelo de Liew & Darveniza, este modelo muestra que para las profundidades cercanas a la superficie el valor de la relación V/I del suelo alcanza valores altos. Sin importar la variación de las profundidades (desde los 0.017 m hasta los 0.35 m), el tiempo de duración de la descarga para todos los casos es similar siendo aproximadamente 7.5  $\mu$ s. Por otro lado, el tiempo de recuperación aumenta proporcionalmente con el aumento del valor del radio del electrodo central.

La Figura 5-5 muestra el cambio de la relación V/I con respecto a la variación del radio y el tiempo de duración de la señal. Como se puede ver el tiempo de duración de la descarga no se ve afectado con el cambio del radio (7.5  $\mu$ s), a pesar de que para los radios menores se observa una caída más rápida. Sin embargo, la duración de la recuperación es mucho más lenta para los radios más grandes y aumenta con la disminución del radio. En el caso de la relación V/I inicial y final, se ve que disminuye con el aumento del radio del electrodo mientras que el valor mínimo es el mismo para todos los casos.

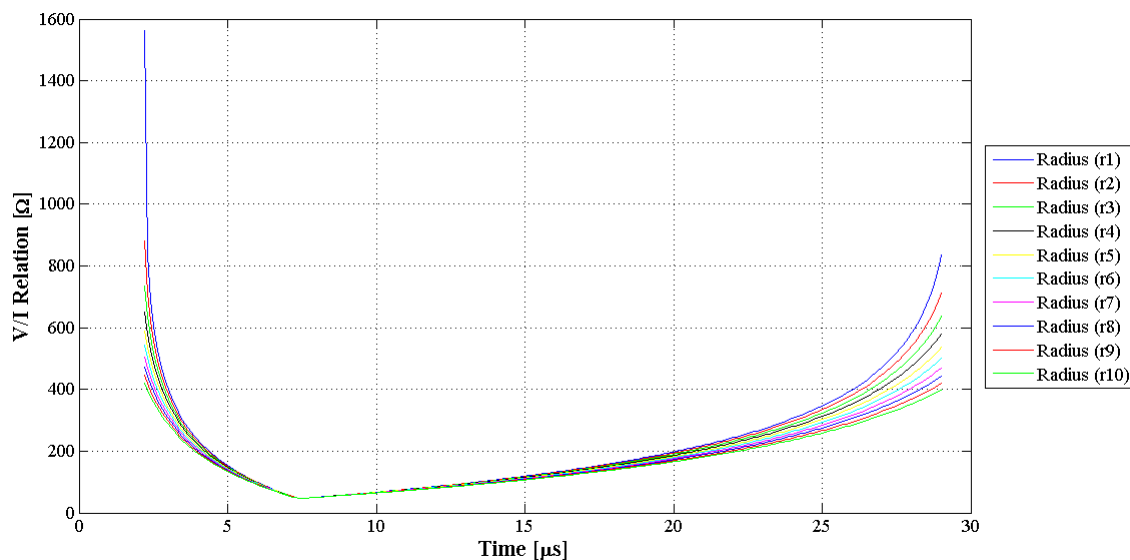


Figura 5-5. Variación de la relación V/I con respecto al cambio del radio del electrodo central para el modelo de Cooray *et. al.* Fuente autores.

### 5.3.3. Análisis para el primer modelo analítico propuesto por Pineda

En la Figura 5-6 se muestra las diferentes curvas de relación V/I al variar los valores de profundidad de enterramiento del electrodo central.

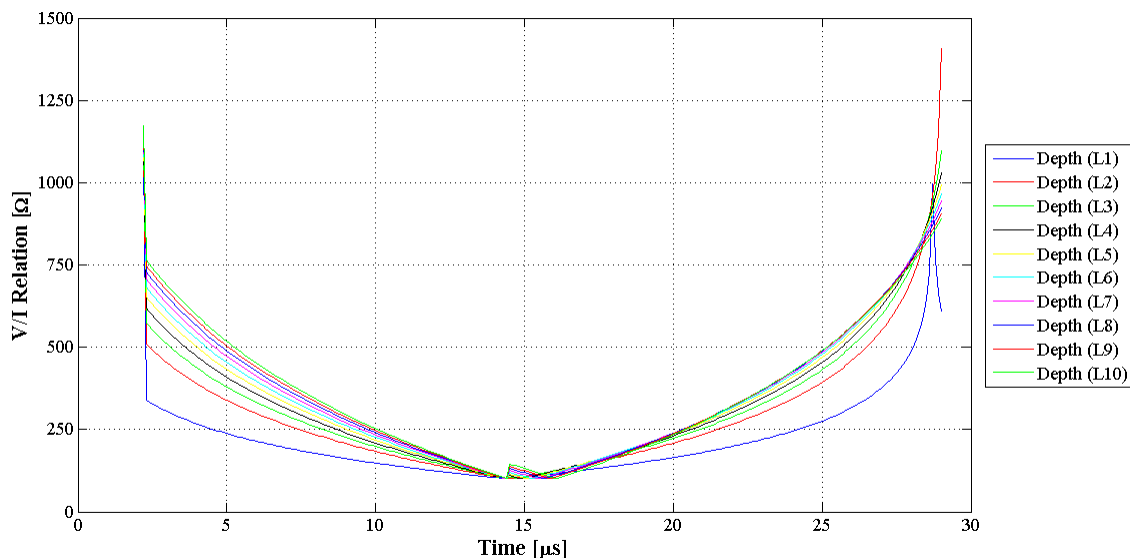


Figura 5-6. Variación de la relación V/I con respecto al cambio de la profundidad de enterramiento para el primer modelo analítico de Pineda. Fuente autores.





A diferencia de los otros dos modelos, al variar la profundidad de enterramiento del electrodo central el valor de la relación V/I aumenta entre los 100  $\Omega$  y los 150  $\Omega$ . En relación a las profundidades más pequeñas, el valor inicial de la relación V/I alcanza los 300  $\Omega$ , 500  $\Omega$  y 620  $\Omega$ , respectivamente, lo que indica que existe un aumento de estos valores con el incremento de la profundidad. El tiempo de duración de la descarga es similar para todos los casos, cerca de los 14  $\mu$ s, sin embargo, a medida que aumenta la profundidad de enterramiento la recuperación de la curva de la relación V/I es mucho más rápida.

La Figura 5-7 muestra el cambio de la relación V/I con respecto a la variación del radio y el tiempo de duración de la señal. Como se puede ver el tiempo de duración de la descarga y recuperación es similar para todos los casos siendo 14  $\mu$ s aproximadamente. No obstante, la recuperación es mucho más lenta para los radios más pequeños y aumenta con el crecimiento del radio. En el caso de la relación V/I inicial y final, se puede observar que aumenta con el crecimiento del radio del electrodo mientras que el valor mínimo es el mismo para todos los casos.

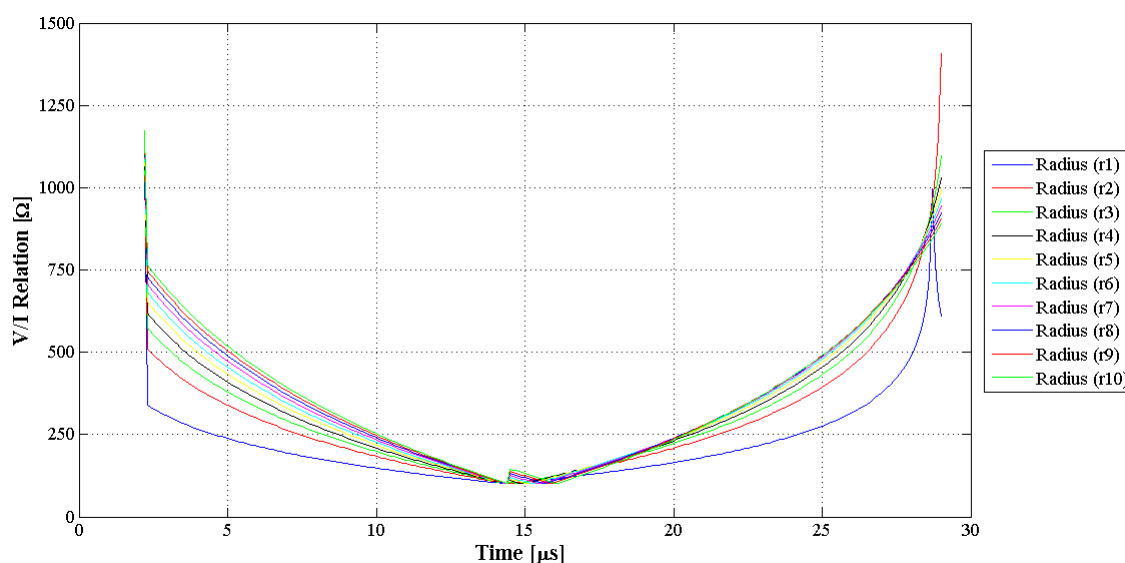


Figura 5-7. Variación de la relación V/I con respecto al cambio del radio del electrodo central para el primer modelo analítico de Pineda. Fuente autores.

#### 5.3.4. Análisis para el segundo modelo analítico propuesto por Pineda y el modelo de Mohamad *et. al.*

Para el segundo modelo analítico de Pineda y el modelo de Mohamad *et. al.* También se realizó el análisis de sensibilidad pertinente para observar su comportamiento al variar los dos parámetros mencionados anteriormente. Sin embargo, el resultado obtenido por estos dos modelos fue el mismo ya que no son sensibles a cambios en la profundidad del electrodo central ni el radio del mismo. De hecho en el capítulo 3 se expuso que estos modelos no tienen en cuenta variables geométricas, sino



variables temporales y físicas que en su mayoría son obtenidas experimentalmente. Respecto al segundo modelo analítico de Pineda se tiene en cuenta la relación  $V/I$  inicial  $Z_o$ , y los tiempos del proceso de descarga y recuperación  $\tau_1$  y  $\tau_2$ . En relación al modelo de Mohamad *et. al.* Solo se tiene en cuenta el valor de relación  $V/I$  durante primer pico de corriente y el tiempo de descarga  $\tau_i$ . La Figura 5-7 (a)) y Figura 5-7 (b)) muestran que la relación  $V/I$  en el modelo de Mohamad *et. al.* no varía con respecto al aumento del radio y la profundidad del electrodo central respectivamente.

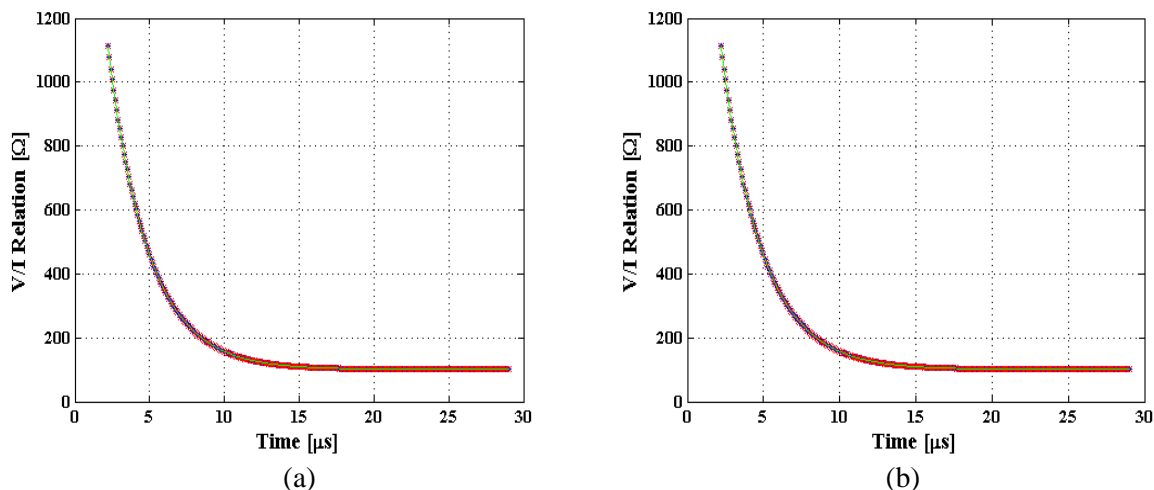


Figura 5-8. Variación de la relación  $V/I$  para el modelo de Mohamad *et. al.* a) Cambio del radio del electrodo central; b) Cambio de la profundidad de enterramiento del electrodo central.

Fuente autores.

A su vez, la Figura 5-8 (a)) y la Figura 5-8 (b)) muestran que la relación  $V/I$  en el segundo modelo analítico de Pineda no varía tampoco al aumento del radio y la profundidad del electrodo central.

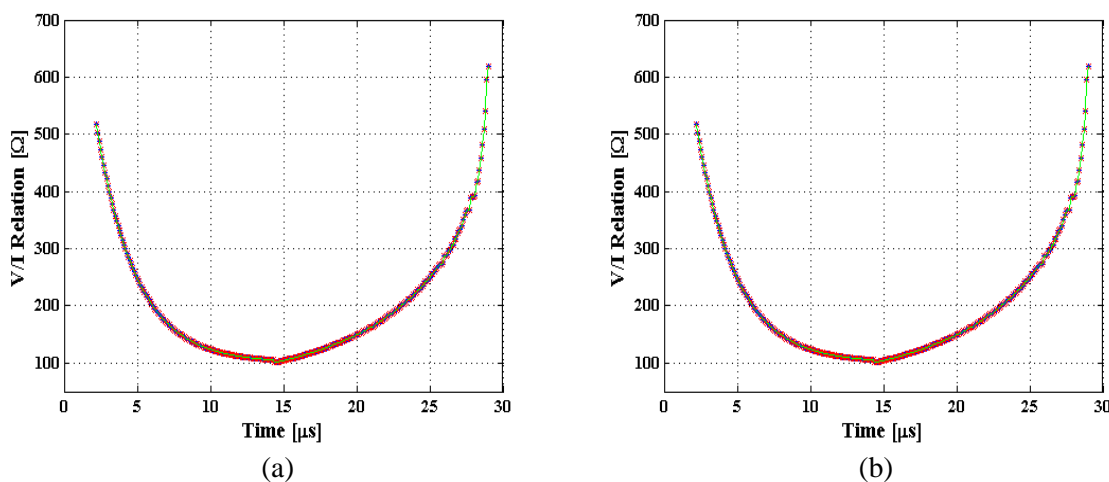


Figura 5-9. Variación de la relación  $V/I$  para el segundo modelo analítico de Pineda. a) Cambio del radio del electrodo central; b) Cambio de la profundidad de enterramiento del electrodo central.

Fuente autores.



#### 5.4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN

De estos resultados experimentales se puede decir:

- El valor de la relación  $V/I$  incrementa con el aumento de la profundidad
- El tiempo de caída de la curva aumenta a medida que la profundidad decrece
- El tiempo de recuperación es mucho más rápido para profundidades cercanas a la superficie. A mayor profundidad, mayor será el tiempo de recuperación de la relación  $V/I$
- El valor de la relación  $V/I$  inicial y final incrementa con el aumento de radio del electrodo central
- El tiempo de caída de la curva aumenta a medida que el radio se incrementa
- El tiempo de recuperación es mucho más rápido para radios pequeños. Al aumentar el radio este tiempo de recuperación se incrementa

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se puede concluir que los modelos de Liew & Darveniza y Cooray *et. al.* representan este mismo comportamiento con excepción del tiempo de duración de la descarga. Esto se debe a que estos dos modelos requieren los valores de tiempo de descarga que se obtienen de manera experimental y que para el análisis permanecieron constantes.



# CAPÍTULO 6. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se describe la metodología implementada para el desarrollo de las pruebas experimentales. En primer lugar, se muestra el circuito generador y los instrumentos de medición utilizados. Posteriormente, se exponen los criterios que se tuvieron en cuenta para la selección de la probeta de pruebas y por último, se muestra el procedimiento usado para llevar a cabo las pruebas experimentales.

## 6.1. CIRCUITO DE GENERACIÓN DE IMPULSOS DE TENSIÓN

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se usó el circuito de generación de impulsos de tensión que fue configurado con ayuda de los elementos disponibles en el Laboratorio de Alta Tensión (LAT) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Esta configuración genera una onda de tensión tipo rayo normalizada 1.2/50  $\mu$ s en vacío, el circuito utilizado se muestra en la Figura 6-1.

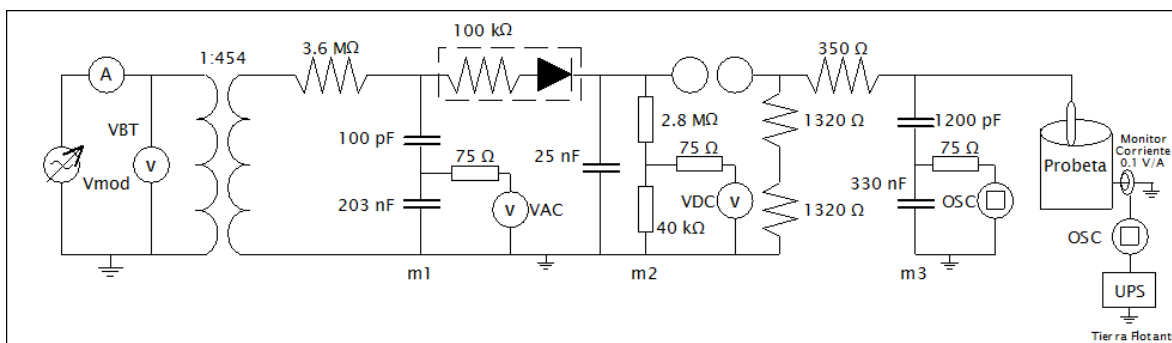


Figura 6-1. Circuito Generador de Impulso de Tensión. Fuente Autores.

Las relaciones de transformación de los divisores de tensión mostrados en la Figura 6-1 son:

- Divisor capacitivo puro  $m1=2031$
- Divisor resistivo puro  $m2=7001$
- Divisor capacitivo puro  $m3=276$

## 6.2. SISTEMA DE MEDIDA

La medición de tensión en el objeto bajo prueba se realizó con un divisor de tensión tipo capacitivo puro cuya relación de transformación es 276. Por otro lado, la medición de corriente se realizó por medio de un transformador de corriente (CT) marca “*Pearson Electronics*” modelo 110 (Ver hoja técnica ANEXO D) cuyas características son:



- Máxima corriente pico: 5 kA
- Resistencia de salida: 50  $\Omega$
- Sensibilidad: 0.1 V/A
- Frecuencia de corte inferior: 1 Hz (Aprox.)
- Frecuencia de corte superior: 20 MHz (Aprox.)

Las señales de tensión y corriente fueron registradas en un osciloscopio digital marca “Rigol” de referencia DS1102E que tiene un ancho de Banda de 100 MHz.

Debido al ruido electromagnético que se origina por los acoples capacitivos existentes entre los elementos del generador de impulsos tipo rayo y el sistema de puesta a tierra del LAT, el osciloscopio fue alimentado mediante un sistema de potencia no interrumpido (UPS). Esto se realizó con el fin de mitigar dicho ruido que se presenta en las sondas que se utilizan para la medición y por lo tanto generan distorsiones en las señales de tensión y corriente.

### **6.3. OBJETO DE PRUEBA**

#### **6.3.1. Tipo de suelo utilizado**

Para las pruebas experimentales se utilizó suelo de tierra vegetal usado para fines de cultivo de hortalizas procedente del norte de la ciudad de Bogotá. A este suelo se le realizó un proceso de tamizado con un pasa-tamiz estándar N° 20 (0.85 mm) disponible en el Laboratorio de suelos de la Universidad Distrital (Sede Tecnológica) tal y como se puede observar en la Figura 6-2. Este proceso se llevó a cabo con el fin de evitar elementos tales como piedras o suciedad presentes en la tierra que pudieran afectar el desarrollo de las pruebas experimentales.



Figura 6-2. Pasa-tamiz utilizado (izquierda) y aspecto final del suelo de tierra vegetal utilizado (derecha).

Fuente Autores.



### **6.3.2. Probeta**

La probeta utilizada para las pruebas experimentales consiste en un arreglo coaxial que está compuesto de dos partes: la primera, está conformada por un electrodo externo de forma cilíndrica fabricado de un material conductor, cuyas funciones son contener el suelo bajo estudio y servir como zona equipotencial de referencia a tierra; la segunda, compuesta por un electrodo interno que es enterrado en el centro del volumen de suelo contenido en el arreglo (cilindro externo) y sobre el cuál se aplican los impulsos de tensión tipo rayo.

#### **A. Diseño del electrodo externo**

En el diseño del electrodo externo se tuvieron en cuenta las siguientes características necesarias para el desarrollo de las pruebas experimentales:

- El material del electrodo debe ser conductor de baja resistencia con el fin de que sirva adecuadamente como zona equipotencial de referencia a tierra y no altere los resultados de las pruebas experimentales
- Las dimensiones del electrodo deben ser las adecuadas de manera que permitan la descarga en el suelo con los niveles de tensión soportados por los elementos del generador de impulsos del LAT
- El peso total del electrodo más el suelo no debe sobrepasar el valor máximo soportado por la balanza disponible en el LAT

#### **B. Selección del electrodo externo**

Con el fin de seleccionar las dimensiones adecuadas del electrodo interno se seleccionaron dos tipos de electrodos, grande y pequeño (Véase Figura 6-3). Ambos electrodos son fabricados en un material conductor llamado hojalata que está constituido en su mayor parte por acero recubierto de estaño [36]. Debido a la resistencia baja que presenta el material de fabricación en ambos electrodos se realizaron mediciones con un micro-óhmetro AEMC 6250 que es un instrumento especializado en obtener medidas confiables para materiales con muy baja resistencia. Los valores obtenidos de las resistencias de los electrodos y otras características importantes de estos se muestran en la Tabla 6-1.



Figura 6-3. Electrodo de hojalata usados para las pruebas.  
Fuente Autores.

Tabla 6-1. Características de los electrodos

<b>Electrodo</b>	<b>Altura [cm]</b>	<b>Diámetro [cm]</b>	<b>Material</b>	<b>Resistencia [mΩ]</b>
<i>Pequeño</i>	19.17	16.75	Hojalata	0.00125
<i>Grande</i>	36	27	Hojalata	0.0033

Tanto el electrodo grande como el pequeño fueron utilizados en la probeta coaxial para realizar las pruebas de disrupción en el suelo cuyo contenido de agua para ambos casos fue del 3% y el peso del suelo seco contenido en cada electrodo fue de 3.5 kg y 13.493 kg respectivamente. El circuito utilizado en estas pruebas es el mostrado en la Figura 6-1.

De estas pruebas se observó que en el electrodo exterior pequeño se llegó a disrupción en el suelo muy rápido, con un valor de tensión DC rms aproximado de 15 kV y tensión pico del impulso de 12.89 kV (Ver Figura 6-4 a)). Contrario a esto, en el electrodo exterior grande no se logró alcanzar el estado de disrupción en el suelo con una tensión aplicada DC rms cercana a 70 kV y un valor de tensión pico de 58.39 kV tal y como se observa en la Figura 6-4 b).

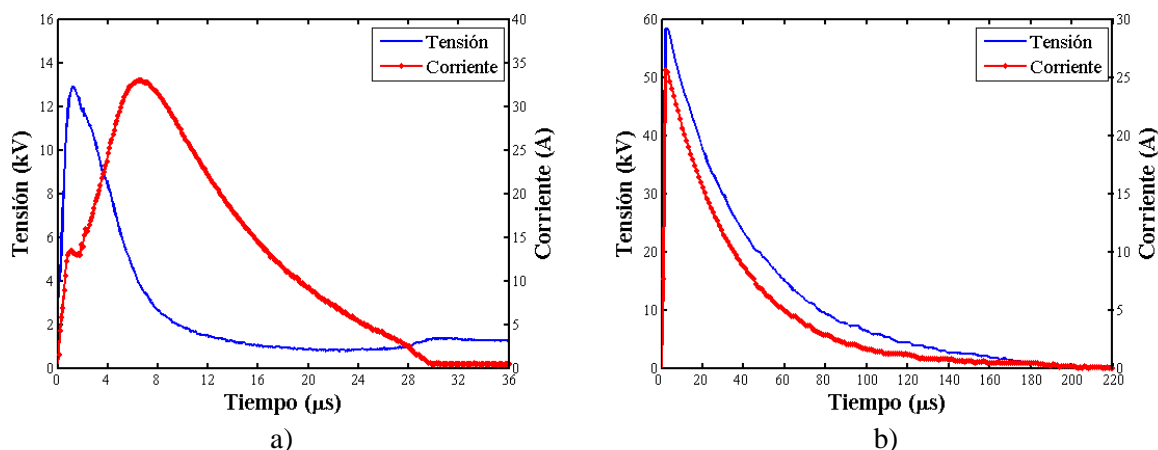


Figura 6-4. Señales de Tensión y Corriente a) Probeta con electrodo “grande”; b) Probeta con electrodo “pequeño”.  
Fuente Autores.

Con estos resultados se concluye que el nivel de tensión aplicado necesario para llegar al estado de disrupción usando el electrodo pequeño es bastante bajo, lo cual implica valores igualmente bajos de corriente en estado no disruptivo. Esto significa que en las señales de corriente se presente mucho ruido, afectando así las mediciones del transformador que está diseñado para dar una mejor respuesta ante niveles altos de corriente. Contrario a esto, para el electrodo grande se deben llegar a valores de tensión muy altos para alcanzar la disrupción con niveles también altos de contenido de agua en el suelo, lo que implica un posible peligro para el generador de impulsos de tensión del LAT.

Es por esta razón que la construcción del electrodo externo debe tener dimensiones intermedias a los dos anteriormente mencionados, que permita alcanzar el efecto de ionización en el suelo a niveles de tensión tolerables para el LAT. Dadas las diferentes respuestas de tensión disruptiva que se obtienen dependiendo de las dimensiones del electrodo exterior, varios autores han llevado a cabo pruebas experimentales similares utilizando electrodos cilíndricos coaxiales. Las características de estas probetas son mostradas en la Tabla 6-2, donde se observa que las dimensiones del electrodo externo difieren de un autor a otro desde 30 cm a 70 cm de altura y desde 2 cm a 29 cm de radio.

Tabla 6-2. Características de las Probetas Usadas por Otros Autores.

Autor	Altura Electrodo Exterior [cm]	Diámetro Electrodo Exterior [cm]	Radio Electrodo Exterior [cm]	Enterramiento [cm]	Porcentaje de Enterramiento [%]	Diámetro Electrodo Interior [cm]
M. Blanco [37]	55	58	29	24	44	0.0127
P. Pineda [7]	70	25.4	12.7	70	100	0.9525
E. P. Nicolopoulou [38]	19	25	12.5	19	100	0.025
T.K. Manna [39]	49.8	5.01	2.505	49.8	100	0.0322
N. A. Idris [40]	30	30	15	15	50	1.2
I.F. Gonos [3]	40	16	8	22.3	56	0.025





De acuerdo a lo anteriormente expuesto, para este trabajo de grado se decidió diseñar un electrodo externo con base a las experiencias observadas en el LAT y las investigaciones hechas por otros autores. La Figura 6-5 muestra el electrodo exterior diseñado de radio  $r_{ext} = 10\text{ cm}$ , altura  $h = 50\text{ cm}$  y peso  $\omega = 1869.1\text{ g}$ . El material del electrodo está compuesto por una lámina de Zinc cuyo espesor es de calibre 24 AWG ( $0.6\text{ cm}$ ); la soldadura del molde cilíndrico se realizó con estaño. Este material fue escogido debido a que es un buen conductor y de fácil moldeado.

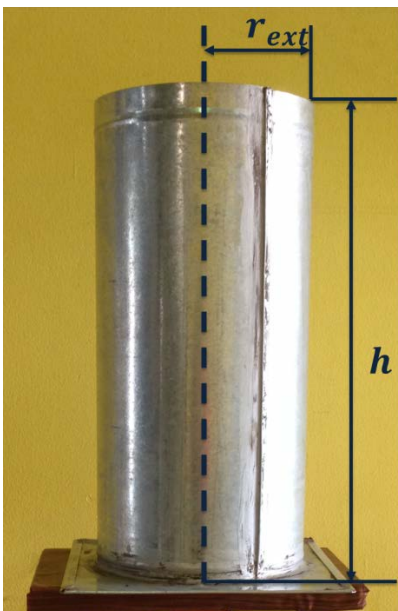


Figura 6-5. Electrodo Exterior Seleccionado. Fuente Autores.

Para obtener el valor de resistencia de este electrodo se realizó una prueba con el micro-óhmetro AEMC 6250 como se muestra en Figura 6-6 donde los valores no superaron los  $0.3389\text{ m}\Omega$ . Con el fin de observar los niveles de tensión requeridos para llegar a la disrupción en el suelo se realizó una prueba preliminar con un contenido de agua en el suelo del 2%, donde se observó que el nivel de tensión donde se alcanzó el estado de disrupción fue aproximadamente de 45 kV pico, valor tolerable para realizar las pruebas necesarias para el desarrollo del trabajo de grado.

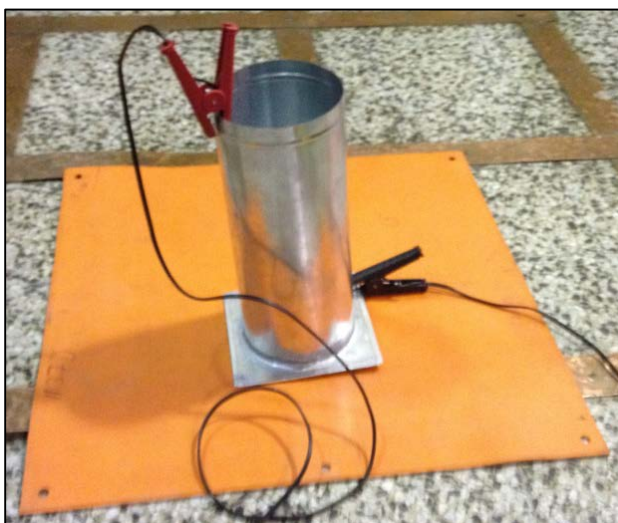


Figura 6-6. Prueba de Resistencia para el electrodo externo. Fuente Autores.

### C. Diseño de la probeta de pruebas

Como se mencionó en la sección 6.3.2 de este documento la probeta de pruebas consiste en un arreglo cilíndrico coaxial. El electrodo interno es de cobre mientras el electrodo externo como se mencionó anteriormente es hecho en zinc. En la Figura 6-7 se muestra el diseño final de la probeta donde se tiene:

- Altura del electrodo exterior  $h = 50 \text{ cm}$
- Radio del electrodo exterior  $r_{ext} = 10 \text{ cm}$

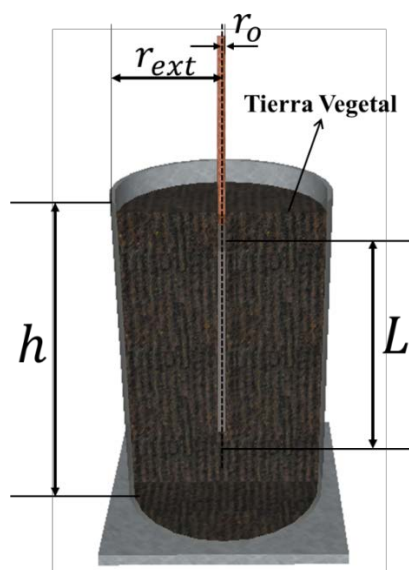


Figura 6-7. Configuración cilíndrica coaxial usada en las pruebas experimentales para observar la descarga en un suelo de tierra vegetal. Fuente Autores.



Debido a que durante el desarrollo de las pruebas experimentales se cambiará el valor del radio y la profundidad de enterramiento del electrodo interno, en la Tabla 6-3 se observan los valores escogidos para las pruebas.

Tabla 6-3. Profundidad de enterramiento y radio del electrodo interno usado en las pruebas experimentales.

Profundidad de enterramiento [ $L$ ]	Radio [ $r_o$ ]
$L_1 = 35 \text{ cm}$	$r_1 = 0.1295 \text{ cm}$
$L_2 = 23.5 \text{ cm}$	$r_2 = 0.635 \text{ cm}$
$L_3 = 11.6 \text{ cm}$	

## 6.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 6.4.1. Cambio en la profundidad de enterramiento e Incremento en el radio del electrodo interior

Con el fin de observar como se ve afectada la respuesta de la relación  $V/I$  del suelo en estado disruptivo, se decidió variar la profundidad de enterramiento y el valor de radio del electrodo interior. Estos valores de profundidad de enterramiento y radio se muestran en la Tabla 6-3 y fueron usados en las pruebas experimentales de este trabajo de grado.

Para darle cierta simetría a las distancias del electrodo interior con respecto al electrodo exterior, se le resto el radio del electrodo exterior (10 cm) a la altura de 45 cm mostrada en la Figura 6-8. Con esto se logró que hubiera el mismo valor de distancia (10 cm) desde el radio interior al exterior y desde la punta del electrodo interior a la base del electrodo exterior.

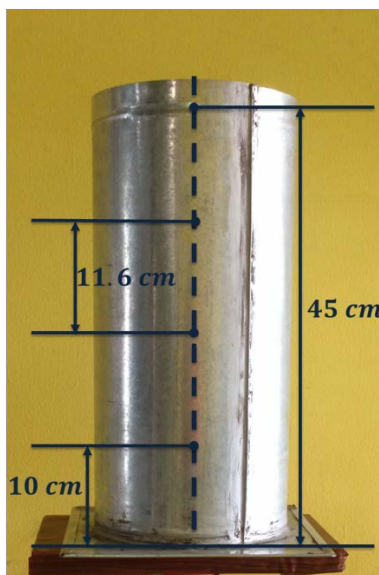


Figura 6-8. Profundidades de enterramiento seleccionadas. Fuente Autores.



En cuanto a la variación en el radio del electrodo interior, se evaluaron dos (2) radios (véase la Tabla 6-3) donde el valor del más grande es aproximadamente cinco (5) veces mayor al valor del más pequeño. Esto con el fin de observar si un cambio significativo en el valor del radio del electrodo interior (varilla) influye de manera directa en la curva de la relación V/I resultante del estado de disrupción en el suelo. Estos valores fueron escogidos en base a los valores disponibles comercialmente.

#### **6.4.2. Contenido de agua en el suelo**

Para las mediciones de tensión y corriente, los contenidos de agua en el suelo fueron variados en tres (3) rangos diferentes: 5%, 8% y 11%. Estos porcentajes se escogieron basados en el estudio realizado por Pineda [7] donde se observó que para valores de humedad inferiores al 1% la relación V/I tomaba magnitudes demasiado altas mientras que se presentaban corrientes muy bajas. Esto llevo a que estas curvas no se pudieran utilizar para la comparación con los modelos propuestos por este autor. Por otro lado, para contenidos de agua mayores o iguales al 12% el suelo se encuentra saturado ya que sus cavidades de aire están llenas de agua, lo que incrementa el campo eléctrico necesario para el inicio de la descarga y a su vez mayores niveles de energía aplicada.

Para determinar el contenido de agua en el suelo se utilizó el método de peso de muestras el cual es expresado en la Ecuación ( 6.1).

$$\%H_2O = \frac{\omega H_2O}{\omega_{suelo}} \times 100 \quad (6.1)$$

donde  $\omega H_2O$  es el peso de agua en gramos que se debe agregar al suelo y  $\omega_{suelo}$  es el peso en gramos del suelo bajo estudio [41].

Al escoger contenidos de agua entre el 1 y 12% se asegura que se pueden observar los diferentes procesos que hacen parte de la disrupción en el suelo de forma más equilibrada, por lo que la curva resultante de la relación V/I se puede comparar con la curva arrojada por los modelos (lo cual es el objetivo principal de este trabajo de grado).

Para obtener un nivel inicial bajo de agua en el suelo (cercano al 0.003%), se seleccionó el método de *air-drying* o secado al aire (secado natural) que consiste en exponer el suelo dejando que el calentamiento a temperatura ambiente remueva lentamente su humedad registrando su peso hasta que sea constante, lo que asegura que el suelo ha perdido todo el contenido de agua [42]. Debido a que la norma Invias INV E-122-07 no recomienda secar en horno suelos con contenido orgánico ya que este material se cancina a altas temperaturas lo que altera la composición química y física del suelo, este método quedo descartado [43].



De acuerdo a esto se extendieron las muestras del suelo en recipientes con un área superficial amplia y poco profunda donde se dejaron secar por aproximadamente tres (3) meses a temperatura ambiente<sup>6</sup> registrando su peso hasta que este fue constante. Luego para alcanzar el contenido de agua requerido se calculó la cantidad de agua que se debía añadir al suelo a partir de la Ecuación ( 6.1), que relaciona el peso del suelo seco y el suelo húmedo para determinar el contenido de agua o humedad presente en el suelo. La balanza utilizada para registrar los datos es de marca Ohaus Explorer Pro modelo EP22001 cuya capacidad es de 22 kg, es una balanza de alta precisión y se encuentra debidamente calibrada para los ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de suelos de la Universidad Distrital.

### 6.4.3. Compactación del suelo

Con el fin de obtener un nivel de compactación similar para todas las pruebas experimentales se realizó un procedimiento basado en el método estándar de compactación del suelo “Proctor Modificado”. Este procedimiento consiste en aplicar el mismo nivel de energía al suelo obteniendo una compactación uniforme. Para lograr esto, el suelo se secciona en capas iguales y se coloca en un cilindro especial indicado para tales fines. A cada capa del suelo se le deja caer un pisón manual o mecánico que tiene una masa conocida a una altura determinada y se aplica uniformemente el mismo número de golpes al suelo para garantizar el mismo nivel de energía. La energía de la compactación aplicada al suelo se muestra en la Ecuación ( 6.2) [41].

$$E_e = \frac{n * N * \omega * h}{V} \quad (6.2)$$

donde  $n$  es el número de capas,  $N$  es el número de golpes aplicados por capa,  $\omega$  es la masa del pisón en [kN],  $h$  la altura de caída del pisón en [m] y  $V$  el volumen del molde cilíndrico [ $m^3$ ].

Debido a que la muestra del suelo utilizada para las pruebas es mucho mayor a las muestras estándares del molde Proctor, y además de que no se cuenta con los elementos para la aplicación exacta de este método estándar (pisón y cilindro), el proceso para el control de compactación del suelo (tierra vegetal) en este trabajo de grado se llevó a cabo de la siguiente forma: el suelo fue dividido en tres (3) capas iguales y este fue dispuesto dentro del electrodo exterior. Luego para aplicar un nivel de energía similar en cada capa, se construyó una base circular del mismo diámetro del electrodo exterior, esta base sirvió para sostener un elemento guía que se utilizó para marcar la altura de 0.3 m a la cual se dejó caer una pesa de masa 2.5 kg (0.025 kN, ver Figura 6-9 a)) y con esto lograr que la fuerza aplicada se distribuya uniformemente en todas las capas del suelo. La probeta usada para llevar a cabo el proceso de compactación, cuya altura total es de 0.5m y diámetro de la base 0.2 m, se muestra en la Figura 6-9 b).

---

<sup>6</sup>Una muestra pequeña de suelo requiere aproximadamente tres (3) días para perder la mayor parte de su contenido de agua mediante el método de secado a temperatura ambiente [45].



a)



b)

Figura 6-9. Proceso de Compactación a) Pesa utilizada de 2.5 kg (0.025 kN); b) Probeta circular de diámetro 0.2 m.  
Fuente Autores.

El grado de compactación se mide en términos de su peso específico seco ( $\gamma_d$ ), que se define como la relación que existe entre el peso del suelo seco y el volumen que este ocupa. La literatura especializada muestra que el peso específico seco para un suelo con un alto contenido orgánico en estado natural se encuentra entre el rango de 6~8 [ $kN/m^3$ ] [41]. Mediante la Ecuación ( 6.3) se puede hallar el peso específico seco del suelo ( $\gamma_d$ ) conociendo su contenido de agua.

$$\gamma_d = \frac{(\omega_H/V)}{1 + \frac{\omega\%}{100}} \quad (6.3)$$

donde  $\omega_H$  corresponde al peso del suelo húmedo en [ $kN$ ] y  $V$  es el volumen del suelo cuando se encuentra compactado en el molde en [ $m^3$ ] y  $\omega\%$  al contenido de agua del suelo expresado en [%]. Con el fin de simular un nivel de compactación natural en el suelo bajo prueba se realizó un ensayo preliminar de compactación con los contenidos de agua seleccionados (5%, 8% y 11%) para obtener el valor de peso específico seco ( $\gamma_d$ ), y así decidir el número de golpes que se deben aplicar sobre el suelo para conservar su estado natural de compactación. Los valores obtenidos se pueden observar en la Tabla 6-4.



Tabla 6-4. Resumen del peso específico húmedo y seco del suelo con respecto a diferentes número de golpes aplicados sobre el suelo

Nº golpes	Contenido de agua	Peso específico del suelo húmedo [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso específico del suelo Seco [kN/m <sup>3</sup> ]
1	5%	8.007	7.630
	8%	8.241	7.630
	11%	8.467	7.630
2	5%	9.008	8.584
	8%	9.271	8.584
	11%	9.525	8.584
3	5%	9.739	9.280
	8%	10.022	9.280
	11%	10.298	9.280

Como se puede observar en la Tabla 6-4 los valores de peso específico seco para un numero de golpes superior o igual a dos (2) están por encima del rango de referencia de 6~8 [kN/m<sup>3</sup>], citado anteriormente en este documento, por lo cual se decidió aplicar un (1) solo golpe por capa al suelo para conservar la misma energía de compactación en todos los casos de estudio de este proyecto de grado. De acuerdo a la Ecuación ( 6.2) la energía de compactación aplicada al suelo es:

$$E_e = \frac{(3 \text{ capas}) * (1 \text{ golpe/capa}) * 0.025 \text{ kN} * 0.3 \text{ m}}{0.0157 \text{ m}^3} = 2.866 \frac{\text{kN} - \text{m}}{\text{m}^3}$$

### 6.5. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

Durante cada una de las pruebas experimentales se siguió una metodología de preparación con el fin de sistematizar el proceso y obtener los mejores resultados posibles. Cada uno de los pasos se explica a continuación:

- a) Realizar el montaje experimental mostrado en la Figura 6-1 utilizando siempre los mismos elementos.
- b) Pesar la muestra del suelo teniendo en cuenta el contenido natural de agua que posee y calcular el peso de agua que se debe agregar para llegar al contenido deseado mediante el método mencionado en la sección 6.4.2 de este documento.



- c) Extender el suelo sobre un recipiente con un área superficial amplia y usando una regadera para fines de jardinería, agregar de forma uniforme el agua sobre el suelo. Luego se mezcla ambos materiales de forma manual hasta lograr que este tenga un aspecto homogéneo.
- d) Realizar el proceso de compactación del suelo indicado en la sección 6.4.3 de este documento.
- e) Pesar la muestra final del suelo con el fin de comprobar que el porcentaje de agua adicionado sea correcto.
- f) Enterrar el electrodo interno de radio  $r_1$  a una profundidad  $L_1$  dentro del suelo y conectar el arreglo cilíndrico coaxial al generador de impulsos de tensión.
- g) Fijar la distancia del espinterómetro para generar un impulso de tensión de 5 kV aproximadamente.
- h) Generar cinco (5) impulsos y por cada uno obtener las señales de tensión y corriente, datos de tensión DC (VDC) mostrados en la Figura 6-1 y datos de las condiciones ambientales tales como humedad, temperatura y presión atmosférica.
- i) Fijar la distancia del espinterómetro para aumentar progresivamente en rangos de 5 kV (aprox.) hasta alcanzar el nivel de tensión al cual el suelo llega al estado de disrupción. Por cada nivel de tensión aplicado repetir el procedimiento del inciso h).
- j) Desconectar el arreglo cilíndrico coaxial del generador de impulsos de tensión del LAT
- k) Pesar la muestra del suelo con el fin de determinar el porcentaje de agua perdido. Si este porcentaje supera el 0.3% se calcula la cantidad de agua que se debe adicionar.
- l) Se repite el procedimiento descrito desde el inciso c) hasta el inciso e) de esta sección

Este procedimiento se reproduce para evaluar cada caso de estudio por cada contenido de agua (5%, 8% y 11%), cambio del radio ( $r_1$ ,  $r_2$ ) y profundidad de enterramiento del electrodo interior ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ ). En total se evaluaron 18 casos de estudio en este trabajo de grado mostrados en la Tabla 6-5.

El número de muestras para las señales de tensión y corriente obtenidas en el LAT es de 600, la frecuencia de muestreo con que se tomaron dichas señales es de 1 MHz. Como se mencionó por cada nivel de tensión aplicado se tomaron cinco (5) señales de tensión y cinco (5) señales de corriente, obteniendo así una cantidad total de 995 señales de tensión y corriente, respectivamente.





Tabla 6-5. Casos de estudio evaluados en las pruebas experimentales

Nº Caso	Contenido de Agua	Radio [ $r_o$ ]	Profundidad de enterramiento [ $L$ ]
1	5%	$r_1$	$L_1$
2			$L_2$
3			$L_3$
4		$r_2$	$L_1$
5			$L_2$
6			$L_3$
7	8%	$r_1$	$L_1$
8			$L_2$
9			$L_3$
10		$r_2$	$L_1$
11			$L_2$
12			$L_3$
13	11%	$r_1$	$L_1$
14			$L_2$
15			$L_3$
16		$r_2$	$L_1$
17			$L_2$
18			$L_3$



# CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

De acuerdo con el procedimiento mencionado en la Sección 6.5 de este documento, durante el desarrollo de las pruebas experimentales se varió las condiciones de contenido de agua en el suelo, el valor del radio y la profundidad de enterramiento del electrodo interior. En este capítulo se describe una parte de los resultados experimentales obtenidos en estado de disrupción del suelo con el fin de analizar cómo se ven afectadas las curvas de tensión, corriente y la relación V/I ante la variación de los tres (3) parámetros mencionados. Adicionalmente, se muestra el análisis comparativo de los resultados obtenidos de forma teórica a partir de los modelos presentados en este documento, y las curvas de la relación V/I observadas en las pruebas experimentales realizadas sobre el suelo de tierra vegetal en la configuración cilíndrica coaxial. Estos resultados se muestran para un (1) solo caso de estudio de los dieciocho (18) mencionados en el capítulo 6 de este documento.

## 7.1. EFECTO DEL INCREMENTO DEL RADIO DEL ELECTRODO INTERIOR

Con el fin de analizar los resultados obtenidos ante la aplicación de un impulso de tensión tipo rayo para los dos valores de radios seleccionados mostrados en la Tabla 6-3, se escogieron dos (2) casos de estudio del total de evaluados. En estos casos, las condiciones de contenido de agua del suelo y profundidad de enterramiento del electrodo central son iguales y el único parámetro variable es el radio del electrodo central o interior. Los casos de estudio seleccionados corresponden al N° 14 y N° 17 mostrados en la Tabla 6-5 de este documento y los valores experimentales presentes en las pruebas se muestran en detalle en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Valores seleccionados para la evaluación del cambio del radio del electrodo central

N° Caso	Contenido de Agua	Profundidad de enterramiento [L]	Radio [ $r_o$ ]
14	11%	$L_2 = 23.5$ cm	$r_1 = 0.1295$ cm
17			$r_2 = 0.635$ cm

### 7.1.1. Estado Disruptivo

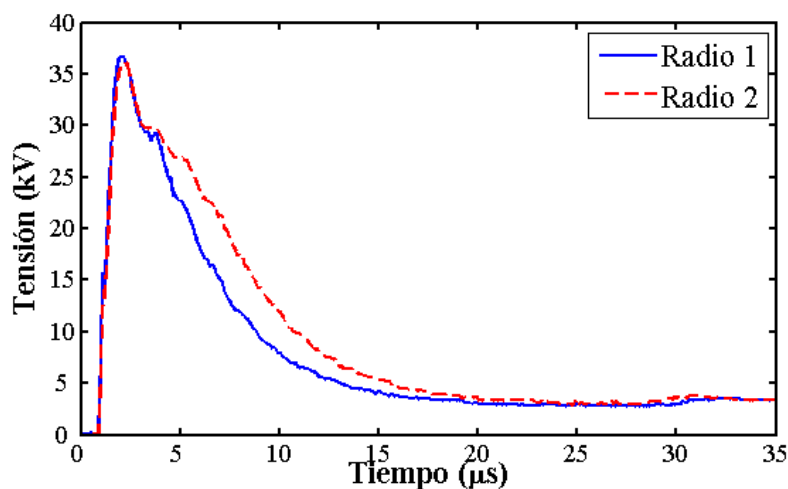
Como se aprecia en la Figura 7-1, ante la presencia de disrupción o descarga en el suelo la forma de onda de las señales de tensión y corrientes se ven alteradas. Por su parte, los tiempos de frente y cola se tornan más rápidos en contraste a los impulsos de tensión para el estado de no disrupción. Las señales de tensión mostradas en la Figura 7-1 a) muestran que para el radio  $r_1$  la onda es de  $1.2/6 \mu s$  y para el radio  $r_2$  es de  $1.35/7.7 \mu s$ , lo que indica que aunque el tiempo de frente no se vio afectado significativamente, el tiempo de cola se hizo más lento para el radio  $r_2$ . Por su parte el



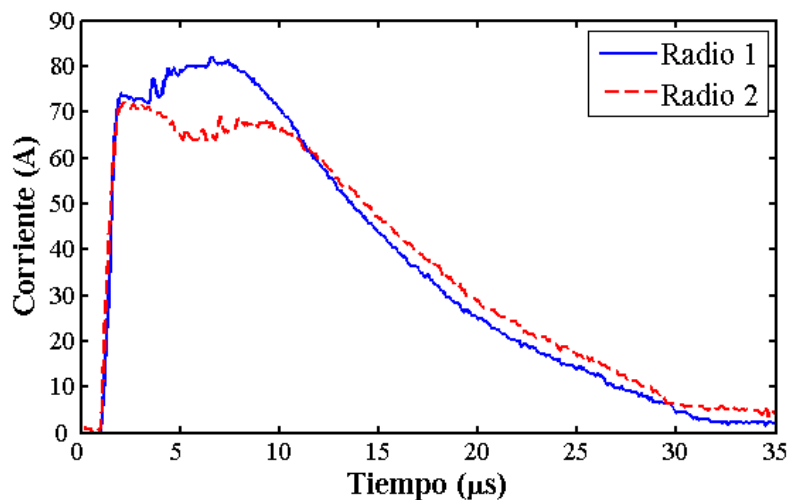
valor pico de tensión tampoco se vio alterado teniendo que para  $r_1$  fue de 36.76 kV y para  $r_2$  de 36.21 kV.

Para las señales de corriente se puede observar en la Figura 7-1 b), que la magnitud de la corriente de conducción para ambos radios ( $r_1$  y  $r_2$ ) tiene un valor apreciable, llegando a valores por encima de los 70 A. Sin embargo, se muestra que para el radio  $r_2$  el proceso dominante es el de conducción, ya que una vez se inicia el proceso de descarga a los 4.1  $\mu s$ , la corriente de descarga disminuye en vez de aumentar (conducta frecuente durante el evento disruptivo en el suelo ver Figura 2-4). Este comportamiento puede deberse al segundo evento disruptivo que se presenta cerca de los 5.2  $\mu s$ , y que se define como fenómeno de doble interrupción. El suceso ha sido observado en presencia de altos contenidos de agua en el suelo, como lo muestra el trabajo realizado por Pineda [7].

Por otro lado, aunque los tiempos de frente fueron más rápidos que los presentados en las ondas de corriente en estado no disruptivo, los tiempos de cola se mostraron un poco más lentos que estos, teniendo para el radio  $r_1$  una onda de 1.24/15.4  $\mu s$  y 1.3/17.9  $\mu s$  para el radio  $r_2$ . De acuerdo a esto, se observa que el tiempo que le toma al progreso de la corriente de descarga para el radio  $r_1$  es menor que para el radio  $r_2$ . En cuanto a los valores pico de la corriente de descarga, se puede apreciar en la Figura 7-1 b) que en relación al radio  $r_1$  la magnitud de 82 A se alcanza a los 6.6  $\mu s$  (luego de iniciada la descarga), siendo mayor que para el radio  $r_2$ , cuya magnitud de corriente de descarga es de 68 A y se presenta cerca de los 8.7  $\mu s$  (después de la segunda interrupción).



a)



b)

Figura 7-1. Señales obtenidas con el cambio del radio en el electrodo interior en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores.

Para la curva de la relación  $V/I$  en estado disruptivo (véase Figura 7-2), se tiene que para el radio  $r_2$  el tiempo de inicio de descarga se produce a los  $4.1 \mu s$ , por lo que es más lento que para el radio  $r_1$  el cual se produce a los  $2.9 \mu s$ . Por otro lado, el tiempo de extinción de la descarga ocurre cerca de los  $30 \mu s$  siendo similar para ambos radios ( $r_1$  y  $r_2$ ), por lo que se observa que el tiempo total en el que sucede el evento disruptivo es menor para el radio más grande  $r_2$ .

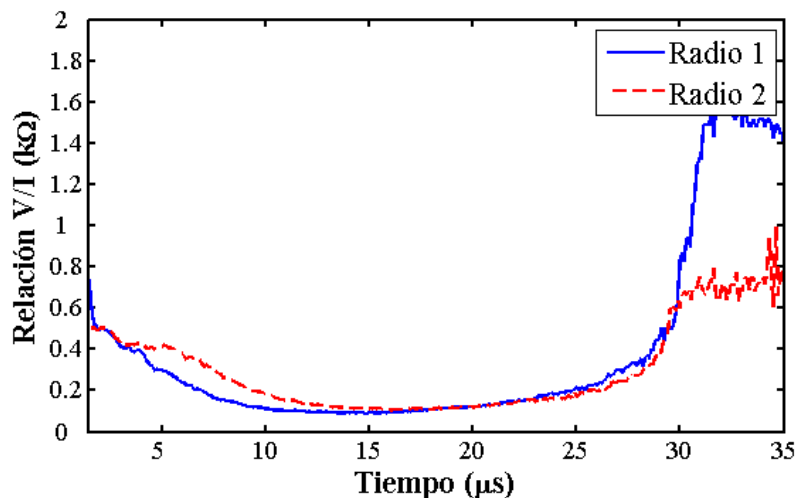


Figura 7-2. Relación  $V/I$  obtenida con el cambio de radio en el electrodo interior en estado disruptivo. Fuente Autores.

Con respecto a la relación  $V/I$  inicial ( $R_o$ ), se puede observar en la Figura 7-2 que tanto para el radio  $r_1$  como para el radio  $r_2$  los valores son próximos:  $390 \Omega$  y  $420 \Omega$ , respectivamente. Por el contrario, para el valor final de la relación  $V/I$  ( $R_f$ ) sí se puede ver una diferencia importante con el



cambio del radio; teniendo que para el radio  $r_1$  este valor es de  $1490 \Omega$  y disminuye notablemente a  $630 \Omega$  para el radio más grande  $r_2$ . El valor mínimo de la relación  $V/I$  ( $R_{min}$ ) es de  $89.07 \Omega$  para el radio  $r_1$  y se presenta a los  $13.6 \mu s$  aproximadamente, mientras que para el radio  $r_2$  este valor aumento un poco a  $104.49 \Omega$  cerca de los  $16.6 \mu s$ .

## 7.2. EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL ELECTRODO INTERIOR

Con el fin de analizar los resultados obtenidos ante la aplicación de un impulso de tensión tipo rayo para los tres (3) valores de profundidad mostrados en la Tabla 6-3, se escogieron tres (3) casos de estudio del total de evaluados en las pruebas experimentales. En estos casos, las condiciones de contenido de agua del suelo y radio del electrodo central son iguales y el único parámetro variable es la profundidad de enterramiento del electrodo central o interior. Los casos de estudio corresponden al N° 4, N° 5 y N° 6 mostrados en la Tabla 6-5 de este documento, donde los valores relacionados con estos tres casos de estudio se muestran en detalle en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Valores seleccionados para la evaluación del cambio de la profundidad del electrodo central

N° Caso	Contenido de Agua	Radio [ $r_o$ ]	Profundidad de enterramiento [ $L$ ]
4	5%	$r_2 = 0.635 \text{ cm}$	$L_1 = 35 \text{ cm}$
5			$L_2 = 23.5 \text{ cm}$
6			$L_3 = 11.6 \text{ cm}$

### 7.2.1. Estado Disruptivo

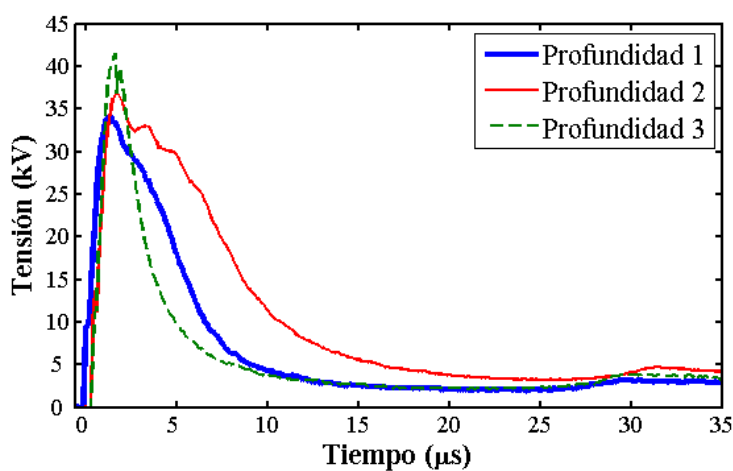
La Figura 7-3 a) muestra las señales de tensión en función del cambio de profundidad de enterramiento del electrodo central  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ . En esta se observa, para la profundidad  $L_1$  los tiempos de frente y cola son  $1.6/6.1 \mu s$  respectivamente, mientras que la tensión pico es de  $34.11 \text{ kV}$ . A su vez, para la profundidad  $L_2$  se tiene una onda de periodo  $1.38/8.5 \mu s$  y una magnitud de tensión máxima de  $36.82 \text{ kV}$ . Por último, en la profundidad  $L_3$  el periodo de la onda es de  $1.24/3.7 \mu s$  y la tensión pico es de  $41.51 \text{ kV}$ .

Lo anterior indica que los valores de tensión pico para las tres ondas tuvieron un pequeño incremento a medida que la profundidad de enterramiento del electrodo interior es menor. También se observó que los tiempos de frente son menores para los impulsos con los valores de profundidad más pequeños, indicando un incremento de la velocidad de ascenso de la tensión a medida que decrece la profundidad. Adicionalmente, en los tiempos de cola se observó que con la menor profundidad ( $L_3$ ) la caída exponencial del impulso de tensión es más rápida en comparación con las demás profundidades.

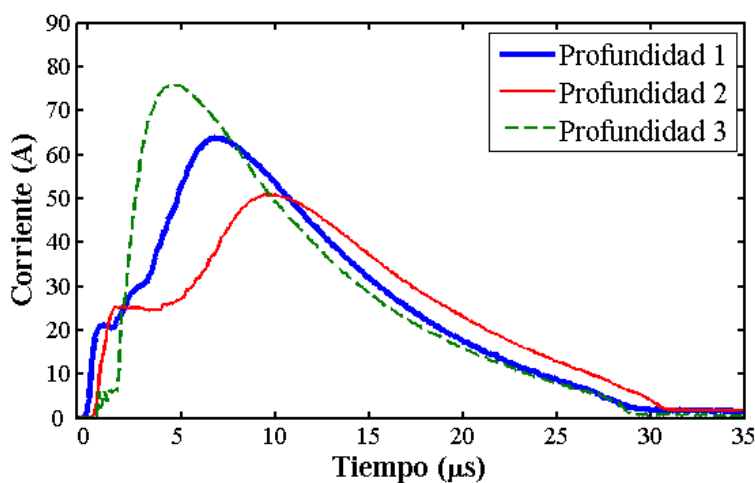


Respecto a las señales de impulso de corriente mostradas en la Figura 7-3 b), se puede inferir que en los primeros  $\mu s$ , la magnitud de corriente de conducción es considerablemente menor para la profundidad más pequeña ( $L_3$ ) en comparación a las otras dos profundidades. Además, en el inicio del proceso de descarga se observa la mayor magnitud de corriente de 75.8 A para la menor profundidad, mientras que el valor más pequeño de 50.8 A se presenta para la profundidad  $L_2$ . Por su parte la profundidad  $L_1$  tuvo un valor pico de 63.84 A intermedio a los dos valores anteriores.

Adicionalmente se aprecia en la Figura 7-3 b), que el tiempo de frente de la onda de corriente para la profundidad  $L_3$  es aproximadamente dos veces más rápido que la profundidad  $L_1$  y tres veces más rápido que la profundidad  $L_2$ . También se observó que el tiempo de cola donde ocurre el progreso y extinción de la descarga, es notablemente menor para la profundidad  $L_3$  en comparación con las demás profundidades. Los tiempos de frente y cola de la onda de corriente para la profundidad  $L_1, L_2$  y  $L_3$  son: 5.89/ 16.4  $\mu s$  7.7/19.6  $\mu s$  y 2.11/13.2  $\mu s$ , respectivamente.



a)



b)

Figura 7-3. Señales obtenidas con el cambio de la profundidad en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores



De acuerdo a la Figura 7-4 se puede observar que para la profundidad  $L_3$  el tiempo de inicio de descarga se produjo a los  $1.2 \mu s$ , donde el valor de la relación  $V/I$  es de  $6670 \Omega$ . En las profundidades  $L_1$  y  $L_2$ , este fenómeno ocurrió casi al mismo tiempo, a los  $3.2 \mu s$  y  $3.3 \mu s$ , cuyas magnitudes de relación  $V/I$  del suelo son  $1290 \Omega$  y  $1060 \Omega$  respectivamente. Una vez se extingue la descarga, el valor de la relación  $V/I$  comienza a descender exponencialmente llegando a su valor mínimo, que para la profundidad  $L_1$  es de  $67.3 \Omega$ ,  $98.8 \Omega$  para  $L_2$  y  $72 \Omega$  para  $L_3$ . Finalmente, el proceso de recuperación culmina aproximadamente a los  $30 \mu s$  para las tres profundidades, donde se observa que el mayor valor de la relación  $V/I$  es para la profundidad  $L_3$  con  $4560 \Omega$ , le sigue la profundidad  $L_2$  con un valor de  $2440 \Omega$  y por último la profundidad  $L_1$  con  $1600 \Omega$ .

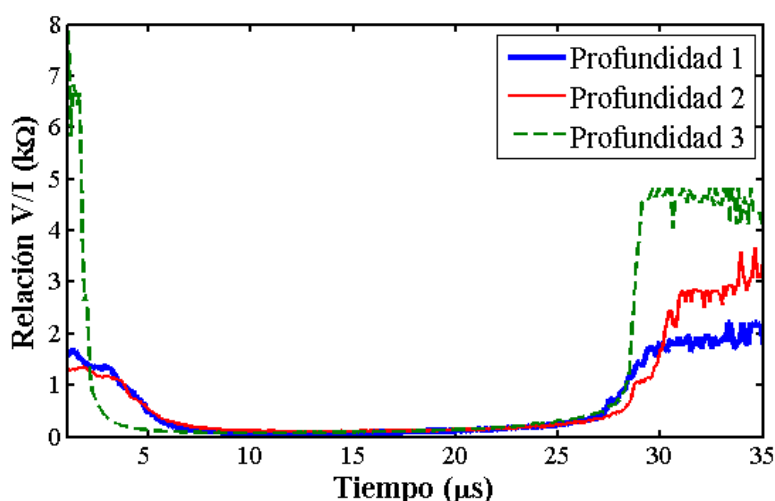


Figura 7-4. Relación  $V/I$  obtenida con el cambio de profundidad en el electrodo interior en estado disruptivo.  
Fuente Autores.

### 7.3. EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Con la finalidad de analizar los resultados obtenidos ante la aplicación de un impulso de tensión tipo rayo para los tres contenidos de agua en el suelo (5%, 8% y 11%), se escogieron tres casos de estudio del total de evaluados en las pruebas experimentales. En estos casos, las condiciones de profundidad de enterramiento y radio del electrodo central son iguales y el único parámetro variable es el contenido de agua del suelo. Los casos de estudio seleccionados corresponden al N° 6, N° 12 y N° 18 mostrados en la Tabla 6-5 de este documento; los valores relacionados con estos tres casos de estudio se muestran en detalle en la Tabla 7-3.



Tabla 7-3. Valores seleccionados para la evaluación del cambio de la profundidad del electrodo central

Nº Caso	Contenido de Agua	Radio [ $r_o$ ]	Profundidad de enterramiento [ $L$ ]
6	5%	$r_2 = 0.635 \text{ cm}$	$L_3 = 11.6 \text{ cm}$
12	8%		
18	11%		

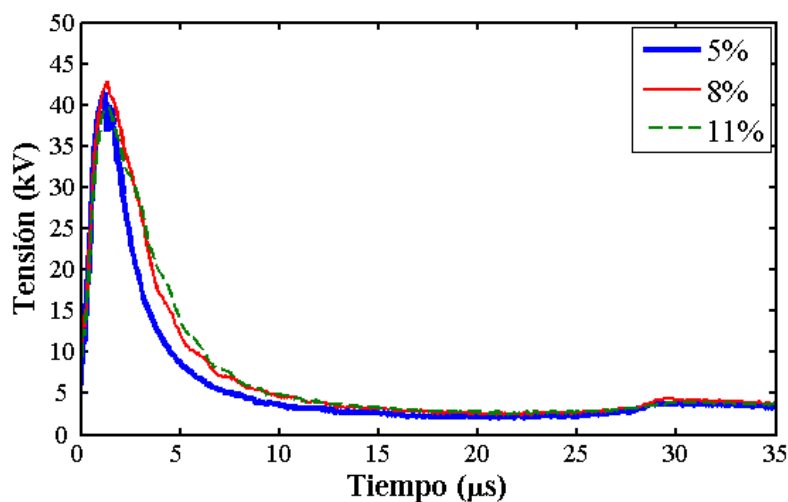
### 7.3.1. Estado Disruptivo

La Figura 7-5 a) muestra que la onda de tensión correspondiente al contenido de agua en el suelo del 5% es 1.24/3.7  $\mu\text{s}$  y con un valor pico de 41.5 kV. Para el caso donde se tiene el 8% de contenido de agua se obtuvo una onda de 1.28/4.4  $\mu\text{s}$  con un valor máximo en la tensión de 42.8 kV. Finalmente, con un contenido de agua del 11% la onda de tensión es de 1.49/4.9  $\mu\text{s}$  y una tensión pico de 39.7 kV. Lo anterior, evidencia que la tensión pico del impulso de tensión no cambió significativamente con la variación de la humedad en el suelo. Por su parte, el tiempo de frente y cola del impulso tuvieron el mismo comportamiento, aumentando con el incremento del contenido de agua; este aumento es mucho mayor para el contenido de agua del 11%.

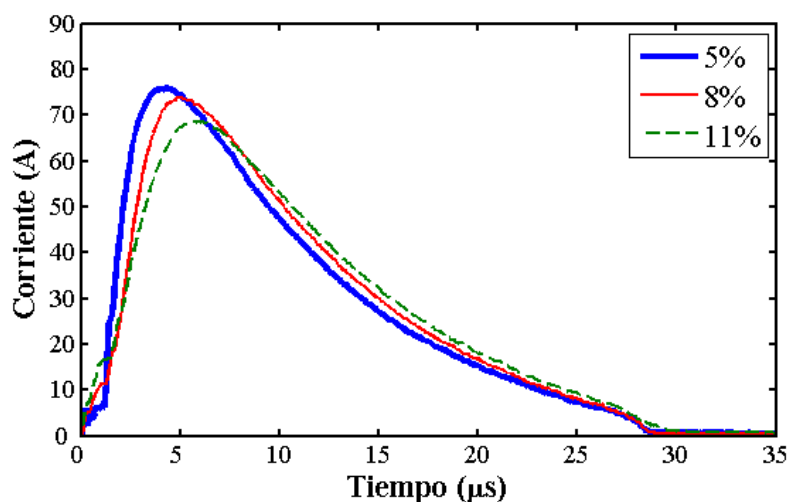
Por otro lado, de la Figura 7-5 b) se observan las ondas de corriente con sus respectivos valores pico para los contenidos de agua del 5%, 8% y 11%. Respecto al contenido de agua más bajo (5%) se tiene una onda de 2.11/13.2  $\mu\text{s}$  y un valor pico de corriente de 75.8 A. Para el contenido de agua intermedio (8%), el tiempo de frente y cola de la onda de corriente aumentaron a 2.98/14.2  $\mu\text{s}$  y el valor máximo de corriente es de 73.9 A, disminuyendo respecto a la primera humedad. Por último, para el contenido de agua más alto (11%) se mostró el mismo comportamiento de descenso en el tiempo de frente, el tiempo de cola y el ascenso del valor pico de corriente de descarga. La onda para este contenido de agua es de 3.88/15.4  $\mu\text{s}$  con un valor pico de 68.6 A.

Adicionalmente se puede observar en la Figura 7-5 b) que del mismo modo que la corriente pico, la corriente de conducción crece de forma escalonada conforme el contenido de agua aumenta. A su vez, los tiempos de inicio de la descarga que se dan cuando cesa la corriente de conducción son menores para valores más altos de contenido de agua en el suelo.





a)



b)

Figura 7-5. Señales obtenidas con el cambio de la humedad en estado disruptivo a) Onda del impulso de tensión; b) Onda de la señal de corriente. Fuente Autores.

En la Figura 7-6 se aprecia que para el contenido de agua del 5% el inicio de la descarga se da a los  $1.2 \mu\text{s}$  con un valor en la relación  $V/I$  de  $6670 \Omega$ . Una vez se aumenta el contenido de agua en el suelo al 8% el tiempo del inicio de descarga aumenta levemente a  $1.3 \mu\text{s}$ , entretanto la relación  $V/I$  del suelo disminuye a un valor de  $3780 \Omega$ . Para el contenido de agua más alto del 11%, el tiempo de inicio de la descarga continua un incremento leve a  $1.4 \mu\text{s}$  donde se presenta un valor en la relación  $V/I$  de  $2340 \Omega$ .

En cuanto al valor mínimo de la relación  $V/I$  se observó que para el 5% de contenido de agua el valor fue de  $72 \Omega$ , mientras se presenta un incremento aproximado constante de  $15 \Omega$  para el 8% y



11%. Por otra parte, la extinción de la descarga se da aproximadamente en el mismo instante de tiempo ( $30 \mu\text{s}$ ) para los tres contenidos de agua seleccionados, donde el valor de la relación V/I es de  $4560 \Omega$  para el contenido de agua del 5%,  $5070 \Omega$  para el 8% y  $1940 \Omega$  para el 11%.

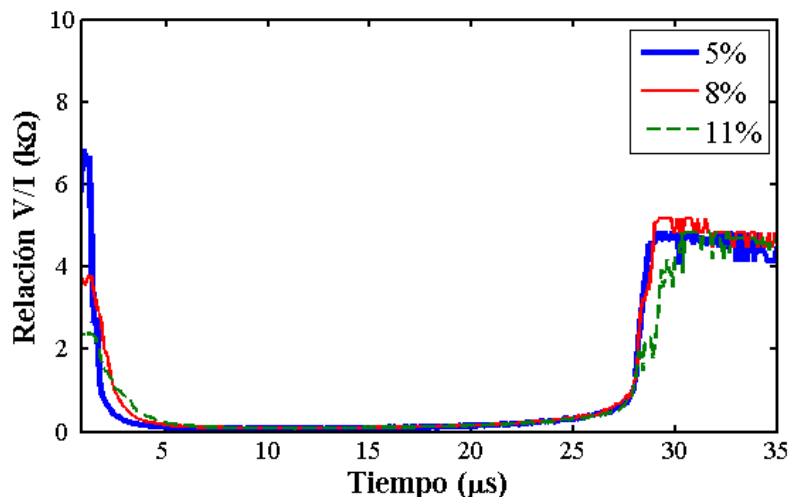


Figura 7-6. Relación V/I obtenida con el cambio de la humedad en estado disruptivo. Fuente Autores.

#### 7.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN UTILIZADOS PARA LA COMPARACION DE LOS MODELOS

Para llevar a cabo la evaluación de los resultados arrojados por los modelos seleccionados, se establecieron dos tipos de análisis: cuantitativo y cualitativo. El análisis cuantitativo es el resultado numérico que se obtiene para cada indicador estadístico. El análisis cualitativo es una valoración respecto a la calidad de los resultados teóricos frente a los experimentales. Este análisis se estableció de acuerdo a los valores que indican un excelente resultado dependiendo del indicador estadístico evaluado (ver sección 4.1).

Respecto al indicador MSPE, de acuerdo al trabajo realizado por [35], un resultado no mayor al 10% presenta buenos resultados y confiabilidad en la comparación entre curvas. No obstante, con el fin de asegurar mejor precisión en la comparación de las curvas teóricas (modelos) y experimentales, se decidió escoger un valor de MSPE menor al 5% como resultado para un calificativo de “Excelente” y para valores no mayores al 10% se estableció un calificativo de “Regular”. A partir de estos rangos se establecieron los demás valores para realizar la evaluación cualitativa en este indicador a partir de los resultados cuantitativos.

De acuerdo a la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2, para los indicadores estadísticos CCC y rxy obtener un resultado muy próximo o igual a 1 significa que la curva teórica es idéntica a la tomada experimentalmente. Es por esto que se definió como “Excelente” un resultado mayor a 0.95 y se fue disminuyendo progresivamente para los demás calificativos.



Finalmente, en relación al indicador estadístico U (ver Tabla 4-3) el valor que indica el mejor resultado es aquel cercano o igual a 0 y el peor resultado es un valor cercano o igual a 1. A partir de este criterio se estableció que para un valor menor a 0.5 el calificativo será de “Excelente” y valores mayores a 1 tendrán un calificativo de “Deficiente”. En la Tabla 7-4 se muestra los diferentes rangos según el indicador estadístico.

Tabla 7-4. Criterios de evaluación cuantitativa y cualitativa.

<b>Tipo Indicador</b>	<b>Excelente</b>	<b>Muy Bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Deficiente</b>
MSPE (w)	$w < 5\%$	$5\% \leq w < 8\%$	$8\% \leq w < 10\%$	$10\% \leq w < 20\%$	$w \geq 20\%$
CCC (x)	$x > 0.95$	$0.85 \leq x < 0.95$	$0.8 \leq x < 0.85$	$0.75 \leq x < 0.8$	$x < 0.75$
rx <sub>y</sub> (y)	$y > 0.95$	$0.85 \leq y < 0.95$	$0.8 \leq y < 0.85$	$0.75 \leq y < 0.8$	$y < 0.75$
U (z)	$z < 0.5$	$0.5 \leq z < 0.6$	$0.6 \leq z < 0.8$	$0.8 \leq z \leq 1$	$z > 1$

## 7.5. COMPARACIÓN ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y LOS MODELOS FÍSICOS

En esta sección se muestra el análisis de los resultados experimentales obtenidos para uno (1) de los dieciocho (18) casos de estudio evaluados en este proyecto de grado. El caso de estudio seleccionado y sus principales características se muestran en la Tabla 7-5. Los resultados para los demás casos de estudio se muestran en detalle en el Anexo digital de este documento.

Tabla 7-5. Caso de estudio seleccionado.

<b>N° Caso</b>	<b>Contenido de Agua</b>	<b>Radio de la varilla [m]</b>	<b>Profundidad de enterramiento de la varilla [m]</b>
1	5%	0.001295	0.35

### 7.5.1. Caso de estudio N°1

#### A. Modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza

Los datos de entrada ingresados a la herramienta computacional para la aplicación del modelo de Liew & Darveniza [6] se muestran en la Tabla 7-6. Algunos de estos datos fueron obtenidos a partir de las señales de tensión y corriente presentadas en las pruebas experimentales.



Tabla 7-6. Datos de Entrada Modelo Liew & Darveniza-Caso N°1.

DATOS ENTRADA MODELO LIEW & DARVENIZA	
Radio del electrodo interior/varilla [m]:	0.001295
Radio del electrodo exterior [m]:	0.1
Profundidad de enterramiento de la varilla [m]:	0.35
Resistencia inicial del suelo [ $\Omega$ ]:	1115.3
Tensión crítica disruptiva [V]:	39740
Constante de tiempo de ionización [ $\mu$ s]:	0.4
Tiempo medido desde el inicio de la ionización [ $\mu$ s]:	1.2
Constante de tiempo de desionización [ $\mu$ s]:	10
Tiempo medido desde el inicio de la recuperación [ $\mu$ s]:	17.9

En la Figura 7-7 se muestran las curvas teórica y experimental superpuestas para el análisis visual. En primer lugar se observa que en el instante previo a la descarga (punto inicial) ambas curvas parten de una relación V/I inicial similar; una vez se inicia la descarga y hasta los  $7\mu$ s aproximadamente se puede ver que las dos curvas tienen un comportamiento similar. A partir de este momento, la curva teórica difiere de la experimental primero disminuyendo levemente (entre  $7\mu$ s y  $14\mu$ s) y luego aumentando entre  $15\mu$ s y  $27\mu$ s hasta alcanzar el valor final.

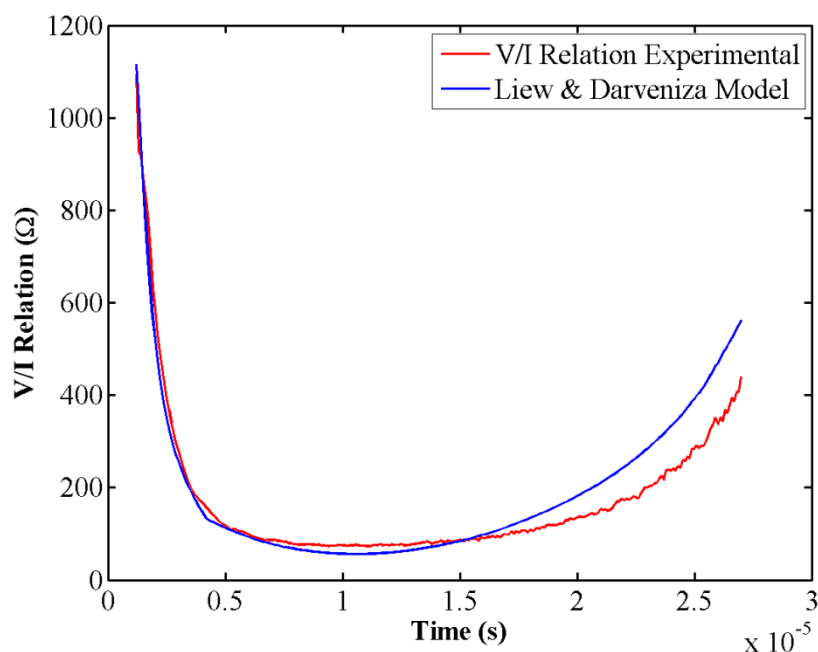


Figura 7-7. Comparación entre el modelo Liew & Darveniza y los resultados experimentales-Caso N°1. Fuente Autores.



**B. Modelo físico-térmico propuesto por Cooray *et. al.***

Los datos de entrada ingresados a la herramienta computacional para la aplicación del modelo de Cooray *et. al.* [15] se muestran en la Tabla 7-7. Algunos de estos datos fueron obtenidos a partir de las señales de tensión y corriente presentadas en las pruebas experimentales.

Tabla 7-7. Datos de Entrada Modelo Cooray *et al*-Caso N°1.

<b>DATOS ENTRADA MODELO COORAY ET. AL.</b>	
<b>Radio del electrodo interior/varilla [m]:</b>	0.001295
<b>Radio del electrodo exterior [m]:</b>	0.1
<b>Profundidad de enterramiento de la varilla [m]:</b>	0.35
<b>Resistencia inicial del suelo [<math>\Omega</math>]:</b>	1115.3
<b>Tensión crítica disruptiva [V]:</b>	39740
<b>Contenido de agua en el suelo [%]:</b>	5%
<b>Temperatura ambiente [K]:</b>	298.15

En la Figura 7-8 se observa como la representación del modelo difiere considerablemente de la curva experimental. A pesar que ambas curvas parten de un valor inicial en la relación  $V/I$  ( $R_o$ ) similar en casi el mismo instante de tiempo ( $t_d$ ), este modelo presenta un tiempo de ionización ( $t_{io}$ ) mucho menor, alcanzando su valor mínimo (casi cero) cerca de los  $4\mu s$ . Esto no coincide con la curva experimental, donde la relación  $V/I$  mínima ( $R_{min}$ ) es de  $92 \Omega$  y se alcanza a los  $11.5 \mu s$ . Por su parte, el tiempo de recuperación ( $t_r$ ) presentado por el modelo es mayor y la curva tiene una pendiente más pronunciada alcanzando un valor final en la relación  $V/I$  ( $R_f$ ) de  $800 \Omega$ . Esta magnitud es casi el doble que la observada experimentalmente de  $486 \Omega$ .

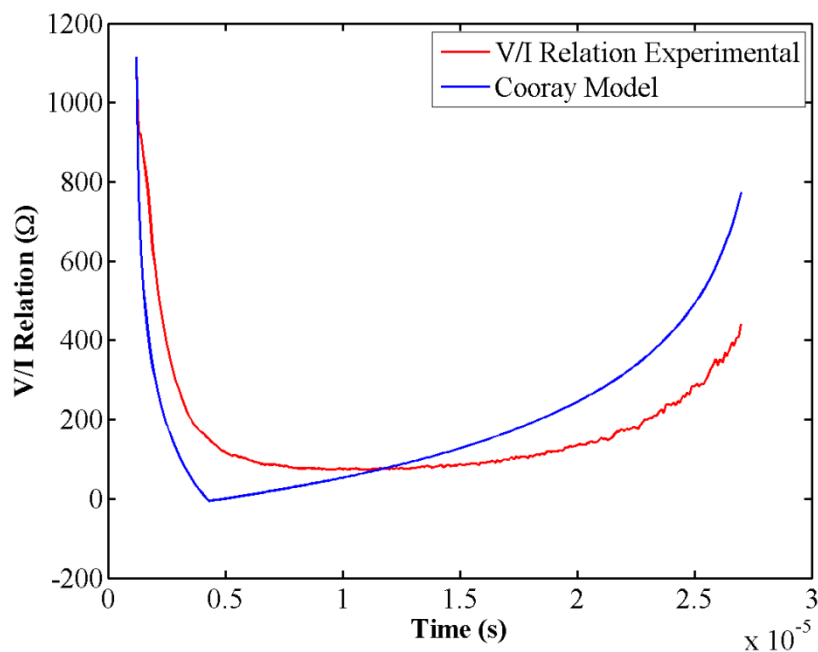


Figura 7-8. Comparación entre el modelo Cooray *et. al.* y los resultados experimentales-Caso N°1. Fuente Autores.

### C. Primer modelo analítico propuesto por Pineda

Los datos de entrada ingresados a la herramienta computacional para la aplicación del primer modelo analítico de Pineda [7] se muestran en la Tabla 7-8. Algunos de estos datos fueron obtenidos a partir de las señales de tensión y corriente presentadas en las pruebas experimentales.

Tabla 7-8. Datos de Entrada Modelo Analítico 1 de Pineda-Caso N°1.

DATOS ENTRADA PRIMER MODELO ANALÍTICO PINEDA	
Radio del electrodo interior/varilla [m]:	0.001295
Radio del electrodo exterior [m]:	0.1
Profundidad de enterramiento de la varilla [m]:	0.35
Resistencia inicial del suelo [Ω]:	1115.3
Permeabilidad relativa del suelo [Adimensional]:	1
Permitividad relativa del suelo [Adimensional]:	6
Tiempo de decaimiento de Z [μs]:	10
Tiempo de Incremento de Z [μs]:	15.8



DATOS ENTRADA PRIMER MODELO ANALÍTICO PINEDA	
Frecuencia del impulso [Hz]:	500000

Se puede observar en la Figura 7-9 que a lo largo de todo el proceso de descarga y recuperación, las curvas teórica y experimental tienen grandes diferencias. En el tiempo de inicio de la descarga ( $t_d$ ), el valor inicial de la relación V/I del suelo ( $R_0$ ) para el modelo es mucho mayor que la obtenida de manera experimental. Durante el desarrollo de la descarga la curva teórica decrece de manera lenta respecto a la curva experimental hasta los 10  $\mu$ s, donde alcanza el valor mínimo. Luego, empieza una recuperación más rápida hasta el final de la curva a los 27  $\mu$ s, donde se tiene que el valor final de la relación V/I del modelo de 700  $\Omega$  aprox. sobrepasa al valor obtenido de forma experimental de 486  $\Omega$ .

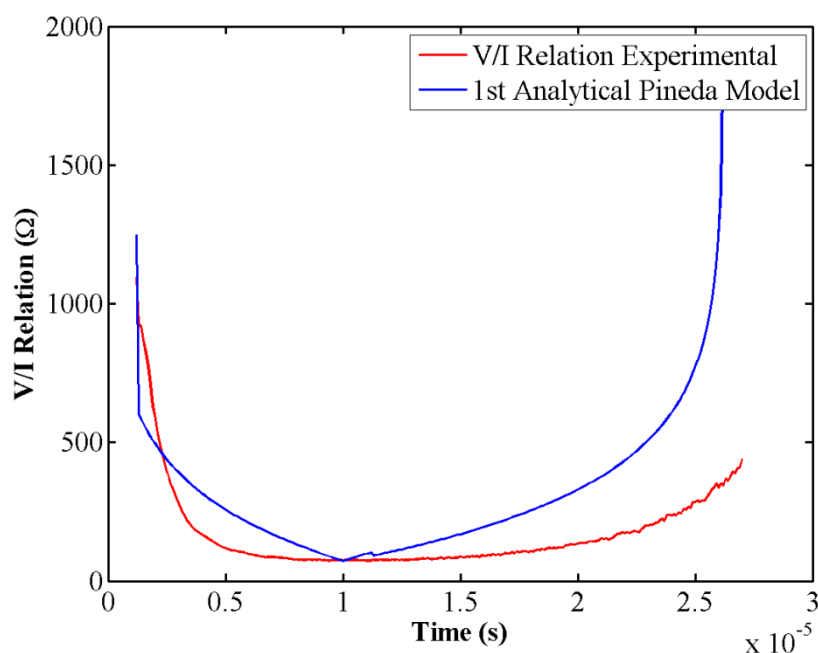


Figura 7-9. Comparación entre el primer modelo analítico de Pineda y los resultados experimentales-Caso N°1. Fuente Autores.

#### D. Segundo modelo analítico propuesto por Pineda

Los datos de entrada ingresados a la herramienta computacional para la aplicación del segundo modelo analítico de Pineda [7] se muestran en la Tabla 7-9. Algunos de estos datos fueron obtenidos a partir de las señales de tensión y corriente presentadas en las pruebas experimentales.



Tabla 7-9. Datos de Entrada Modelo Analítico 2 de Pineda-Caso N°1.

DATOS ENTRADA SEGUNDO MODELO ANALÍTICO PINEDA	
Valor inicial de la relación V/I en no descarga [ $\Omega$ ]:	1115.3
Tiempo de decaimiento de Z [ $\mu$ s]:	1.2
Tiempo de Incremento de Z [ $\mu$ s]:	17.9
Tiempo inicio de la recuperación de la descarga [ $\mu$ s]:	11.2

Como se muestra en la Figura 7-10, la relación V/I inicial ( $R_o$ ) para la curva experimental es de 1115.3  $\Omega$  (ver Tabla 7-9) sobrepasando en más del 50% al valor mostrado por la curva teórica de aproximadamente 500  $\Omega$ . Una vez se inicia la descarga cerca de los 1.2  $\mu$ s se observa una diferencia significativa entre los valores de la relación V/I de ambas curvas hasta aproximadamente los 7.5 $\mu$ s. Sin embargo, el comportamiento de la recuperación es muy cercano durante los siguientes 20 $\mu$ s con excepción de una pequeña diferencia desde los 25  $\mu$ s hasta finalizar el proceso de recuperación de la relación V/I.

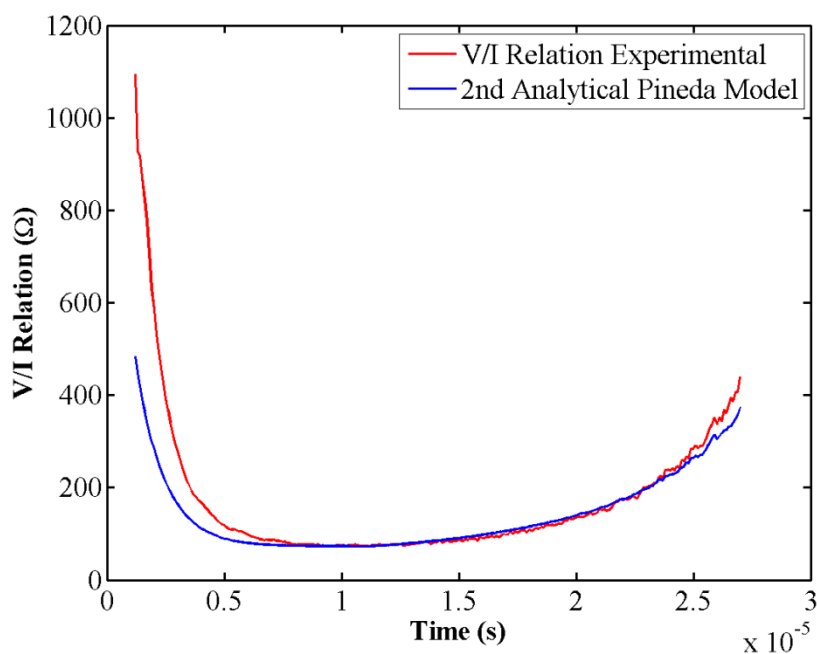


Figura 7-10. Comparación entre el segundo modelo analítico de Pineda y los resultados experimentales-Caso N°1.  
Fuente Autores.

### E. Modelo propuesto por Mohamad *et. al.*

Los datos de entrada ingresados a la herramienta computacional para la aplicación del segundo modelo analítico de Pineda [7] se muestran en la Tabla 7-10. Estos datos fueron obtenidos a partir de las señales de tensión y corriente presentadas en las pruebas experimentales.





Tabla 7-10. Datos de Entrada Modelo de Mohamad *et. al.*-Caso N°1.

DATOS ENTRADA MODELO MOHAMAD ET. AL.	
Resistencia de pre-ionización [ $\Omega$ ]:	2873.39
Constante de tiempo de la propagación de la ionización [ $\mu$ s]:	1.2

En la Figura 7-11 se puede ver que en el tiempo inicial de la descarga ( $t_d$ ) los primeros valores de la relación V/I del suelo son similares entre ambas curvas (experimental y teórica). Este comportamiento casi idéntico en ambas curvas se observa durante el proceso de descarga hasta los 13  $\mu$ s aproximadamente. Sin embargo, en la región de recuperación la curva arrojada por el modelo muestra un comportamiento lineal y constante lo que difiere bastante del comportamiento observado experimentalmente.

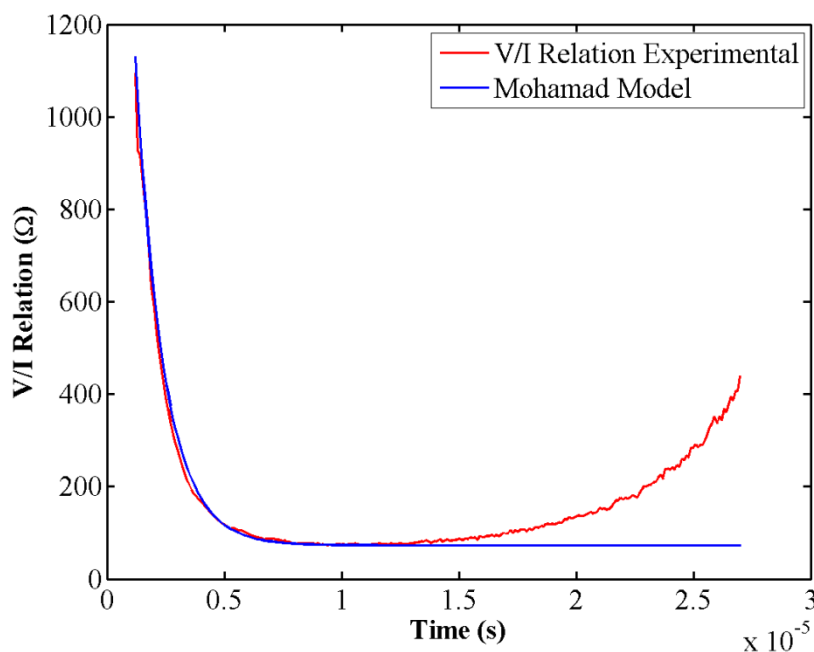


Figura 7-11. Comparación entre el modelo Mohamad *et. al.* y los resultados experimentales-Caso N°1.  
Fuente Autores.

Los resultados cuantitativos obtenidos mediante los indicadores estadísticos se muestran en la Tabla 7-11. Se puede concluir mediante el indicador MSPE, que el modelo que obtiene el menor error acumulado es el segundo modelo analítico de Pineda. La curva teórica con las mejores correlaciones CCC y rxy es la presentada por el modelo de Liew & Darveniza y la que presenta menor desigualdad U es la obtenida del modelo de Mohamad *et. al.*

De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, se observó que el modelo que mejor representa el fenómeno completo (región de descarga y recuperación) es el modelo de Liew &



Darveniza, mientras que el segundo modelo analítico de Pineda representa de manera más cercana la región de recuperación, y el modelo de Mohamad *et. al.* representa de manera similar la región de descarga. Para los modelos de Cooray *et. al.* y el primer modelo analítico de Pineda se pudo observar que las curvas no describen apropiadamente el fenómeno, por lo que es natural que se presenten errores (MSPE) muy grandes. Esto conlleva a que todos los indicadores estadísticos arrojen resultados poco satisfactorios.

Tabla 7-11. Resultados estadísticos cuantitativos-Caso N°1.

MODELO	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
<b>Liew &amp; Darveniza</b>	6.5873	0.98175	0.959226	0.61813
<b>Cooray <i>et. al.</i></b>	46.1111	0.86917	0.71827	0.96297
<b>Pineda Modelo Analítico 1</b>	63.4112	0.92686	0.84178	1.9358
<b>Pineda Modelo Analítico 2</b>	3.1675	0.94399	0.89631	0.72086
<b>Mohamad <i>et. al.</i></b>	14.133	0.90852	0.8567	0.56441

Los resultados cualitativos se muestran en la Tabla 7-12, donde se puede observar que a pesar de que el segundo modelo analítico de Pineda tiene menor error acumulado (MSPE), comparte un calificativo de “Excelente” con el modelo de Liew & Darveniza. Esto permite apreciar que el modelo que presenta los mejores calificativos es el de Liew & Darveniza, y para este caso en específico puede ser usado para predecir el comportamiento de la relación V/I del suelo bajo estudio. No obstante, el segundo modelo analítico de Pineda e incluso el modelo de Mohamad *et. al.* presentan buenos resultados, por lo que cualquiera de estos dos modelos también pueden ser usados para describir de manera muy cercana el fenómeno de ionización del suelo.

Tabla 7-12. Resultados estadísticos cualitativos-Caso N°1.

MODELO	MSPE	CCC	rx <sub>y</sub>	U
<b>Liew &amp; Darveniza</b>	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno
<b>Cooray <i>et. al.</i></b>	Deficiente	Muy Bueno	Deficiente	Regular
<b>Pineda Modelo Analítico 1</b>	Deficiente	Muy Bueno	Bueno	Deficiente
<b>Pineda Modelo Analítico 2</b>	Excelente	Muy Bueno	Muy Bueno	Bueno
<b>Mohamad <i>et. al.</i></b>	Regular	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno



## 7.6. RESUMEN DE RESULTADOS

En el ANEXO B se presentan el consolidado de los resultados de los indicadores estadísticos para los dieciocho (18) casos de estudio evaluados en este proyecto de grado. Realizando el promedio para los valores resultantes de cada indicador estadístico se obtienen los valores mostrados en la Tabla 7-13.

Tabla 7-13. Promedio de resultados obtenidos para los indicadores estadísticos

MODELO	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
<b>Liew &amp; Darveniza</b>	12.619	0.978	0.948	0.717
<b>Cooray <i>et. al.</i></b>	193.835	0.862	0.682	1.086
<b>Pineda Modelo Analítico 1</b>	302.188	0.877	0.697	2.326
<b>Pineda Modelo Analítico 2</b>	4.009	0.951	0.906	0.765
<b>Mohamad <i>et. al.</i></b>	14.762	0.898	0.774	0.895

Como se observa en el ANEXO B, para el caso N°6 respecto al modelo de Mohamad *et. al.* se obtuvo un valor para el MSPE de 1772.61%, este valor se encuentra por fuera del rango observado en los dieciocho (18) casos de estudio para este modelo, por lo que excluyó del cálculo para hallar el promedio obteniendo así el valor mostrado en la Tabla 7-13.

En las tablas mostradas en el ANEXO B se puede apreciar que en general para los cuatro (4) indicadores estadísticos evaluados, se obtuvieron los resultados más deficientes para los casos de estudio N° (3, 6, 9, 12, 15 y 18) donde el electrodo central (interior) tiene la profundidad más pequeña ( $L_3 = 11.6$  cm). Este comportamiento se ve evidenciado de manera más notable para los modelos de Cooray *et. al.* y el primer modelo analítico de Pineda, donde se observa que estos modelos no arrojan una curva muy cercana a la mostrada experimentalmente. Es por esto, que los indicadores estadísticos referentes a estos casos de estudio muestran resultados poco satisfactorios afectando el promedio general mostrado en la Tabla 7-13.

Realizando un conteo de los calificadores cuantitativos por cada modelo para los cuatro (4) indicadores estadísticos, se obtienen los resultados de la Tabla 7-14. En esta se muestra que el modelo de Liew & Darveniza obtuvo la mayor cantidad de calificativos “Excelente”, el segundo modelo analítico de Pineda obtuvo la mayor cantidad de calificativos “Muy bueno”, siguiéndole muy de cerca el modelo de Mohamad *et. al.*.

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que estos modelos arrojan los resultados más acertados respecto al comportamiento de disrupción del suelo estudiado en este proyecto de grado. Por otro lado, el modelo que obtuvo la mayor cantidad de “Deficiente” fue el primer modelo analítico de Pineda y el modelo de Cooray *et. al.*, lo que indica que estos modelos no son tan eficientes simulando las condiciones de laboratorio del suelo estudiado bajo la influencia de ionización.



Tabla 7-14. Conteo para los indicadores estadísticos.

<b>MODELO</b>	<b>Excelente</b>	<b>Muy bueno</b>	<b>Bueno</b>	<b>Regular</b>	<b>Deficiente</b>
<b>Liew &amp; Darveniza</b>	32	20	6	10	4
<b>Cooray <i>et. al.</i></b>	3	12	6	15	36
<b>Pineda Modelo Analítico 1</b>	5	12	7	5	43
<b>Pineda Modelo Analítico 2</b>	12	28	17	12	3
<b>Mohamad <i>et. al.</i></b>	4	21	12	24	11



## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

---

En este trabajo de grado se presentó el comportamiento no lineal de la relación V/I de un suelo de tierra vegetal ante la aplicación de impulsos de tensión tipo rayo. En el capítulo 2, se muestra una breve descripción de las principales características físicas y químicas del suelo de tierra vegetal y como este tipo de suelo se encuentra presente en las capas superficiales del suelo de la ciudad de Bogotá. Adicionalmente, se introdujo el concepto del comportamiento de la relación V/I del suelo tanto en estado de no disrupción como de disrupción, comportamiento observado en pruebas experimentales hechas por diferentes autores. De estos estudios de laboratorio, se observó que en el estado de disrupción la relación V/I del suelo tiene una respuesta dinámica o no lineal, lo que ha llevado a formular diversos modelos físicos que representen dicha respuesta.

En el capítulo 3, se describe la formulación matemática para cinco (5) de los modelos más difundidos en la literatura especializada. Debido a que los modelos presentados por Liew & Darveniza [6] y Cooray *et. al.* [15] están planteados para simular la respuesta no lineal del suelo en superficies infinitas, en este trabajo de grado se propuso una solución para encontrar el radio crítico acorde con las dimensiones de la probeta seleccionada para las pruebas experimentales. En el capítulo 4, se presenta el diseño de los algoritmos para cada modelo seleccionado y su implementación en el software MATLAB ®. Esto se realizó con el fin de validar los resultados obtenidos por estos algoritmos y los mostrados en los trabajos realizados por los autores de los modelos.

A partir de la formulación de dichos algoritmos, en el capítulo 5, se muestra el diseño de una interfaz gráfica realizada mediante la programación de código en MATLAB ®. Esto facilitó el ingreso de los datos de entrada de cada modelo y permitió obtener los resultados gráficos y estadísticos, así como establecer comparaciones entre los modelos. En el capítulo 6, se expone la metodología utilizada para llevar a cabo las pruebas experimentales teniendo en cuenta las limitaciones presentes en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Distrital. Finalmente en el capítulo 7, se presentan el análisis y los resultados obtenidos para la variación de la humedad, profundidad y radio del electrodo interior en las pruebas experimentales y los resultados adquiridos por la herramienta computacional para la comparación entre las señales experimentales y las arrojadas por los modelos.

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas para este trabajo de grado en base a lo expuesto en los capítulos descritos en este documento.

- Respecto al análisis de sensibilidad presentado en el Capítulo 5, se demuestra que los modelos de Liew & Darveniza, Cooray *et al.*, y el primer modelo analítico de Pineda, al tener incluidos dentro de sus parámetros de entrada características geométricas del arreglo de electrodos, son sensibles a cambios en el radio y profundidad de enterramiento del electrodo central (interior).



Los cambios más notorios para la región de descarga de la curva de la relación V/I, se observaron en el valor inicial de la relación V/I, mientras que el cambio más notorio en la región de recuperación o extinción de la descarga se observó en la variación de la relación V/I final que alcanza el suelo.

- El segundo modelo analítico de Pineda y el modelo Mohamad *et. al.* ya que no involucran dentro de sus datos de entrada las dimensiones del arreglo de electrodos, la curva de la relación V/I (respuesta del modelo) no se vio alterada. Esto se debe principalmente a que estos modelos dependen principalmente de valores que son extraídos experimentalmente como los son los tiempos y magnitudes involucrados en el fenómeno de descarga y recuperación de la relación V/I.
- A partir de los resultados experimentales es posible observar en la Figura 7-8 que la variación de la profundidad de enterramiento afecta el tiempo de inicio de la descarga en el suelo, siendo mayor este tiempo para las profundidades de enterramiento más pequeñas. Esto no se observó en las curvas arrojadas por MATLAB ® para el análisis de sensibilidad, ya que la variación de los parámetros de entrada se hizo para la profundidad de enterramiento y no para los tiempos que intervienen en el fenómeno de ionización.
- Del comportamiento experimental de la curva de la relación V/I del suelo ante la variación del radio del electrodo central ( $r_o$ ), se puede observar que esta variación afecta los tiempos de descarga y recuperación de la curva de la relación V/I. Al comparar estos resultados experimentales con el análisis de sensibilidad se evidencia un comportamiento similar donde se observa que entre mayor sea el radio del electrodo central, menor será el tiempo de descarga y recuperación de la curva.
- En relación a la variación del contenido de agua en el suelo, en la Figura 7-6 se puede ver que el valor inicial de la relación V/I ( $R_o$ ) disminuye con el aumento de la humedad. Adicionalmente, el tiempo de descarga se incrementó con la humedad, esto puede deberse a que un alto contenido de agua en el suelo limite el inicio del proceso de disrupción en él, y se pueda ver afectado ya que el valor de la relación V/I es menor. Por último, el valor mínimo de la relación V/I ( $R_{min}$ ) permanece muy similar con el aumento de la humedad, esto podría presentarse a que durante la fase final del proceso de descarga en el suelo, cuando la relación V/I llega a su valor mínimo, el agua que posee el suelo ya se ha evaporado y la conducción eléctrica se presenta solamente en los espacios de aire que existen entre los granos del suelo.
- De los resultados obtenidos mostrados en el Capítulo 7, se observa que para todos los 18 casos de estudio analizados el modelo de Liew & Darveniza presentó los mejores resultados cuyo promedio para el indicador CCC es 0.9775 y para el coeficiente U es 0.7165. Esto se debe a que el modelo incluye tanto parámetros geométricos del arreglo de electrodos como parámetros que son observados experimentalmente, lo que permite ser más preciso al representar la totalidad del fenómeno en la región de descarga y recuperación de la relación V/I del suelo.



- Respecto a los resultados del Capítulo 7, para el segundo modelo analítico de Pineda [7], se evidencia que este modelo es capaz de describir mejor la región de recuperación de la curva de la relación V/I a comparación de la región de la descarga, sin embargo, los resultados obtenidos de los indicadores estadísticos para este modelo fueron suficientemente buenos, siendo para el indicador CCC de 0.9505 y para el coeficiente U de 0.7648.
- En relación a los resultados para el modelo de Mohamad *et. al.* [2] (Ver Capítulo 7), se observa que este es más preciso para simular la región de descarga de la curva de la relación V/I del suelo, este modelo es el que tiene la formulación matemática más sencilla ya que las iteraciones dependen de menor cantidad de variables de entrada. Pese a que este modelo no presentó los mejores resultados que en promedio fueron para el indicador CCC de 0.8982 y para el coeficiente U de 0.8951, estos son satisfactorios para que este modelo pueda ser tenido en cuenta en la descripción del fenómeno de descarga en el suelo.
- Aunque los modelos de Cooray *et. al.* [15] y el primer modelo analítico de Pineda [7] no presentaron buenos resultados si es importante resaltar que los dos modelos involucran datos de entrada adicionales que no se tuvieron en cuenta en los otros modelos. Para el caso del modelo de Cooray *et. al.* este comprende de parámetros térmicos de entrada y adicionalmente implica dentro de sus cálculos el aumento de la temperatura y la disipación de la energía en el volumen de aire presente en el suelo que hacen de este modelo uno de los más completos al analizar el fenómeno de ionización en el suelo. Por su parte, el primer modelo analítico de Pineda tiene en cuenta las propiedades electromagnéticas del suelo y la frecuencia del impulso aplicado, datos de entrada que también pueden afectar la respuesta que tiene el suelo ante fenómenos de ionización producidos por un rayo.
- De acuerdo al Capítulo 7 de este documento, se puede observar en las tablas de resumen de resultados de ANEXO B que en general, los modelos que mejor representan la respuesta de la relación no lineal V/I del suelo son el segundo modelo analítico de Pineda y el modelo de Liew & Darveniza. Esto se debe a que el modelo de Pineda depende de variables obtenidas de observaciones experimentales y de un factor de ajuste ( $k$ ) que permite encontrar la mejor respuesta en comparación con la curva experimental. Por otra parte, a pesar que el modelo de Liew & Darveniza esta formulado para hallar la relación V/I no lineal del suelo en superficies infinitas, gracias a la solución planteada en este proyecto de grado para limitar la variación del radio crítico a las dimensiones establecidas para la probeta cilíndrica coaxial, este modelo mostró muy buenos resultados para la mayoría de casos de estudio evaluados.
- En el ANEXO B, también se puede observar el modelo propuesto por Cooray *et. al.* presento resultados deficientes que en promedio para el indicador CCC es 0.8617 y para el coeficiente U 1.086. Esto puede ser causado a que este modelo está diseñado para representar la relación V/I no lineal del suelo en superficies infinitas, para lo cual se intentó restringir la variación del radio, y que este no superará el valor del radio exterior del arreglo cilíndrico coaxial, así como se hizo



para el modelo de Liew & Darveniza. Sin embargo, esta modificación no logró que el modelo mostrará resultados satisfactorios frente a los datos experimentales.

- El otro modelo que no presento resultados satisfactorios fue el primer modelo analítico de Pineda mostrando un resultado promedio para el indicador CCC de 0.8771 y para el coeficiente U de 2.3263. Aunque este modelo muestra un comportamiento aproximado no logra simular con precisión la respuesta de tipo exponencial que tiene la relación V/I del suelo en estado de ionización. Esto debido a que la formulación matemática del modelo involucra logaritmos, además que los tiempos de descarga y recuperación de la curva se asumen a velocidad constante y no tienen en cuenta las consideraciones temporales del fenómeno.
- Del consolidado de resultados mostrados en el ANEXO B de este documento, se puede observar que en los casos de estudio donde se tenía la profundidad más pequeña ( $L_3$ ), se evidenció la afectación que tuvo el desempeño de la mayoría de modelos para mostrar resultados cercanos a la curva experimental, haciendo que los errores entre ambas curvas fueran muy grandes para algunos casos. En particular, el primer modelo analítico de Pineda y el modelo de Cooray *et. al.* fueron los que más se vieron influenciados por esta condición específica de Laboratorio.
- La respuesta del modelo de Cooray *et. al.* con una profundidad de enterramiento del electrodo central ( $L_3$ ), puede ser causada debido a que las condiciones térmicas dentro del suelo cambian con una profundidad de enterramiento muy cercana a la superficie, ya que la penetración de la corriente al suelo se dispersa de diferente manera y las elevaciones de temperatura y disipación del calor dentro del suelo se ven afectadas por esta circunstancia.
- El diseño de la probeta cilíndrica coaxial usada para las pruebas experimentales fue el adecuado para cumplir satisfactoriamente el propósito de simular el suelo infinito, como contenedor del suelo de tierra vegetal y como electrodo de conducción de la corriente a tierra.
- Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se observó que las pérdidas del contenido de agua en el suelo están por debajo del 1%, debido a que el impulso de tensión tipo rayo es transitorio, y este no generó suficiente calor como para evaporar grandes cantidades de contenido de agua en el suelo de la probeta. Por esta razón, las pérdidas no afectaron el comportamiento general del fenómeno de ionización en el suelo durante las repeticiones descritas en el Capítulo 6.
- De acuerdo a los resultados de los indicadores estadísticos mostrados en la Tabla 4-10, se demuestra que los algoritmos usados para la aplicación de todos los modelos estudiados implementados en MATLAB®, se ajustan de manera adecuada para representar el fenómeno de ionización en el suelo, y arrojar resultados confiables que permitan la comparación con datos experimentales.





- El diseño de la interfaz gráfica de la herramienta computacional permitió integrar y comparar de forma visual y estadística los resultados de los diferentes modelos y los resultados experimentales, facilitando la interacción del usuario y el procesamiento de datos. Esta herramienta computacional se diseñó para que pueda ser utilizada en cualquier caso experimental similar al descrito en este documento, y que tenga como objetivo evaluar la relación  $V/I$  no lineal del suelo bajo la influencia de ionización aplicando un impulso de tensión tipo rayo.



# APORTES

---

Durante el estudio realizado en este proyecto de grado para alcanzar los objetivos planteados, se desarrollaron diferentes metodologías y herramientas para la experimentación y procesamiento de los datos los cuales condujeron a una serie de aportes que son diferentes a los encontrados en el estado del arte consultado para este proyecto. Los aportes son:

- Se compararon los modelos físicos más difundidos en la literatura especializada de la relación no lineal  $V/I$  de un suelo ionizado, donde se encontró que los modelos que mejor se ajustan en general al comportamiento estudiado en este documento, son el segundo modelo analítico de Pineda y el modelo de Liew & Darveniza.
- Se estudió la respuesta de la relación  $V/I$  de un suelo de tierra vegetal ante un fenómeno de ionización, cuyo comportamiento no ha sido ampliamente investigado, lo que contribuye a la caracterización eléctrica de estos tipos de suelos que permitan una mejor comprensión del fenómeno de ionización en ellos.
- Se realizó una metodología experimental que permitió controlar las condiciones de humedad y compactación del suelo, con esto se aseguró que la muestra de suelo conservará las mismas propiedades y por lo tanto las pruebas experimentales arrojarán resultados confiables
- Debido a que el modelo de Liew & Darveniza está planteado para ser aplicado a un suelo en una superficie muy grande (infinita), se propuso una solución para limitar la variación del radio crítico a las dimensiones establecidas para la probeta cilíndrica coaxial, la cual funcionó muy bien para el modelo permitiendo que este sea usado para configuraciones coaxiales en un laboratorio.
- En este trabajo de grado se pueden ver las bases para la construcción de un modelo ajustado, tanto a las pruebas en electrodos coaxiales, como aquellas realizadas sobre un suelo infinito. Además de proporcionar la aplicación de los modelos a un suelo diferente.
- Se realizó el diseño de una herramienta computacional con una interfaz gráfica capaz de procesar los datos de entrada para cada modelo, y graficar las curvas resultantes de la relación  $V/I$  no lineal de un suelo ionizado, que pueden ser exportadas a un archivo de imagen o a Microsoft Excel ®. Adicionalmente, esta herramienta permite la comparación entre las curvas experimentales y teóricas de forma visual y estadística para determinar qué modelo mostro el comportamiento más cercano al observado experimentalmente.



# TRABAJOS FUTUROS

---

A medida que se fueron alcanzando los objetivos propuestos para este proyecto de grado, se evidenciaron algunas actividades que deberían ser desarrolladas para ampliar y completar la investigación de este proyecto. A continuación se muestran los trabajos futuros que pueden ser llevados a cabo.

- Formular un modelo físico nuevo o mejorar uno existente que describa el comportamiento de la relación V/I del suelo de una forma flexible, siendo capaz de arrojar resultados confiables para cualquier tipo de suelo o configuración de electrodos.
- Realizar una investigación teórico-experimental con otros tipos de suelos y condiciones ambientales que no hayan sido evaluadas y con esto profundizar en el fenómeno de ionización del suelo.
- Realizar una investigación experimental para la validación de los modelos evaluados en este proyecto de grado aplicando al suelo impulsos de corriente (8/20 $\mu$ s) e impulsos tipo maniobra (250/2500 $\mu$ s).
- Desarrollar una herramienta computacional que incluya mejoras en el funcionamiento y opciones al usuario de manera que facilite su uso y eficiencia en el análisis de los resultados.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] F. H. Wang and Z. J. Jin, "The FEM Analysis of Grounding System When Considering the Soil Ionization Phenomenon under Different Soil Structures," in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011, pp. 1–4.
- [2] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 353–361, 2006.
- [3] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Soil ionisation under lightning impulse voltages," *Sci. Meas. Technol.*, vol. 151, no. 5, pp. 343–346, 2004.
- [4] W. Sima, L. Luo, T. Yuan, Q. Yang, Y. Tang, and Y. Zhou, "Experimental Analysis on the Change Regulation of the Soil Resistivity Considering the Thermal Effect around the Grounding Electrode," in *Asia Pacific International Conference on Lightning*, 2011, vol. 7th, pp. 1–4.
- [5] A. Habjanic and M. Trlep, "The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 867–870, Apr. 2006.
- [6] A. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 121, no. 2, 1974.
- [7] P. J. Pineda, "Comportamiento dinámico de los suelos ante la aplicación de ondas de impulso tipo rayo en un electrodo concentrado de puesta a tierra," Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [8] J. H. Montaña, "Puestas a tierra. Variación de los parámetros eléctricos del terreno con la frecuencia y software para el cálculo de potenciales transitorios," Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [9] M. Y. Blanco and H. D. Carrero, "Característica R-I por efecto de la ionización del suelo en los sistemas de puesta a tierra," Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [10] E. J. Rincón, "Estudio Termo-Eléctrico de la Disrupción Eléctrica en Arena Bajo Impulsos Tipo Rayo," Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [11] T. Yuan, W. Sima, and Q. Yang, "Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures," in *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2008, pp. 9–13.
- [12] D. Malagón, R. Siachoque, and J. Serna, *El ABC de los Suelos para No Expertos*, 1st ed. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2010.
- [13] A. L. Lobo-Guerrero, "Factores geológicos que afectan las excavaciones en Bogotá D. C. ., Colombia," Bogotá D.C., 2008.
- [14] Y. Liu, N. Theethayi, R. Gonzalez, and R. Thottappillil, "The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results," in *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record*, 2003, vol. 2, pp. 794–799.
- [15] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, and Y. Liu, "Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionisation," *J. Electrostat.*, vol. 60, no. 2–4, pp. 193–202, Mar. 2004.
- [16] A. Haddad, H. Griffiths, M. Ahmeda, and N. Harid, "Experimental Investigation of The Impulse Characteristics of Practical Ground Electrode Systems," in *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010, pp. 469 – 472.
- [17] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System," vol. 1983. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, 1984.



- [18] IEEE Power Engineering Society, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.” Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.
- [19] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, “Ground electrode resistance measurements in non uniform soils,” *Power Appar. Syst.*, pp. 109–115, 1973.
- [20] E. Madero, I. Valenzuela, H. Castro, Á. García, R. Zapata, N. Osorio, A. Varela, D. Rueda, R. Silva, A. Torrente, M. Gómez, F. Munévar, A. Sánchez, and H. Orjuela, *Ciencia del Suelo: Principios Básicos*, 1st ed. Bogotá D.C.: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2010.
- [21] A. Vallejo, *Manual de Restauración de Minas a Cielo Abierto*. La Rioja: Control Ambiental y Restauración, 2006.
- [22] Unidad docente e investigadora de la Facultad de Ciencias Universidad de Granada. España, “Propiedades de diagnóstico del suelo,” *Edafología y Química Agrícola*, 2010. [Online]. Available: <http://edafologia.ugr.es/carto/tema01/wrb06/f68745.htm#anchorarriba>.
- [23] F. E. Chica Ramirez, “Materiales higroscopicos para protecciones contra impulsos de baja tensión. por francia evita chica ramirez,” Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [24] G. Ala, M. Silvestre, and F. Viola, “Soil ionization due to high pulse transient currents leaked by earth electrodes,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 14, pp. 1–21, 2009.
- [25] J. He, B. Zang, R. Zeng, and B. Zhang, “Experimental Studies of Impulse Breakdown Delay Characteristics of Soil,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 3, pp. 1600 – 1607, 2011.
- [26] C. Mendez and V. Roa, “Comportamiento Térmico y Eléctrico de la Descarga Eléctrica en Arena Bajo Impulsos Tipo Rayo,” Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [27] P. L. Bellaschi, R. Armington, and A. Snowden, “Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds-II,” *AIEE Trans.*, vol. 61, pp. 349–363, 1942.
- [28] A. Aguirre, *Introducción al Tratamiento de Series Temporales: Aplicación a las Ciencias de la Salud*, 1st ed. Ediciones Díaz de Santos, 1994.
- [29] J. Gras, *Diseños de Series Temporales: Técnicas de Análisis*. Edicions Universitat Barcelona, 2001.
- [30] J. M. Guevara Díaz, “Uso correcto de la correlación cruzada en climatología: el caso de la presión atmosférica entre taití y darwin,” *Terra Nueva etapa*, vol. 30, pp. 79–102, 2014.
- [31] S. Gonzáles, E. Acosta, C. Dávila, S. Rodríguez, and Y. Santana, *Ejercicios Resueltos de Econometría: El Modelo de Regresión Múltiple*. Delta Publicaciones, 2006.
- [32] J. M. Bland and D. G. Altman, “Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement,” *Lancet*, vol. 1, no. fig 1, pp. 307–310, 1986.
- [33] C. Fernandez, *Análisis Económico: Una Aproximación Práctica con Shazam*. Delta, 2005.
- [34] N. Arroyo and G. Cubas, *Métodos Bayesianos para la Proyección de Variables Macroeconómicas en Uruguay*, 14th ed. 2011.
- [35] A. Salvador, M. Moreno, and C. Paulo, “Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile,” vol. 30, no. 2, pp. 61–69, 2009.
- [36] V. Moreno, J. García, and J. C. Villalba, “Descripción General de los Humedales de Bogotá, D.C.,” Bogotá.
- [37] Maritza Yamile Blanco Guerrero and Harold David Carrero Cruz, “CARACTERÍSTICA R-I POR EFECTO DE LA IONIZACIÓN DEL SUELO EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA,” 2009.
- [38] E. P. Nicolopoulou, F. E. Asimakopoulou, and I. A. Stathopulos, “Comparison of Circuit Models for the Simulation of Soil Ionization,” in *International Conference on Lightning protección*, 2012.
- [39] T. K. Manna and P. Chowdhuri, “Generalised equation of soil critical electric field EC based on impulse tests and measured soil electrical parameters,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol.



- 1, no. 5, pp. 811–817, 2007.
- [40] N. Idris, H. Ahmad, and M. Isa, “Impulse impedance tests on laboratory model earth electrode,” in *Conference on Applied Electromagnetics proceedings*, 2005, pp. 157–161.
- [41] M. Das Braja and S. Khaled, *Principles of Geotechnical Engineering*, 8TH Ed. Sta: Global Engineering: Christopher M. Shortt, 2014.
- [42] Australian Government, “No Title,” Canberra, 2014.
- [43] I. N. de Vías, “Determinación en Laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, roca y mezclas de suelo-agregados INV-E-122-07,” Bogotá D.C., 2007.
- [44] Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, “Laboratorio de Suelos,” *Métodos analíticos empleados por el Laboratorio Nacional de Suelos*, 2014. [Online]. Available: [http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/tramites!/ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d\\_JydDRwN3t0BXA0\\_vUKMwf28PI4NQL2CbEdFAJ67NCc!/?WCM\\_PORTLET=PC\\_7\\_AIGOB1A08AGF0ISG6J8NS3000\\_WCM&WCM\\_GLOBA L\\_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Web+-+Tramites+y+Servicios/Servicios/Servicios/Laboratorio+de+Suelos/](http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/tramites!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hHT3d_JydDRwN3t0BXA0_vUKMwf28PI4NQL2CbEdFAJ67NCc!/?WCM_PORTLET=PC_7_AIGOB1A08AGF0ISG6J8NS3000_WCM&WCM_GLOBA L_CONTEXT=/wps/wcm/connect/Web+-+Tramites+y+Servicios/Servicios/Servicios/Laboratorio+de+Suelos/).
- [45] E. Casanova, *Introducción a la ciencia del suelo*, Segunda Ed. Caracas: Consejo de desarrollo científico y humanístico-Universidad Central de Venezuela, 2005.



# ANEXOS

## A. DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS MODELOS

A continuación se muestran los algoritmos diseñados a partir de los trabajos presentados por cada autor.

### A-1. Modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza

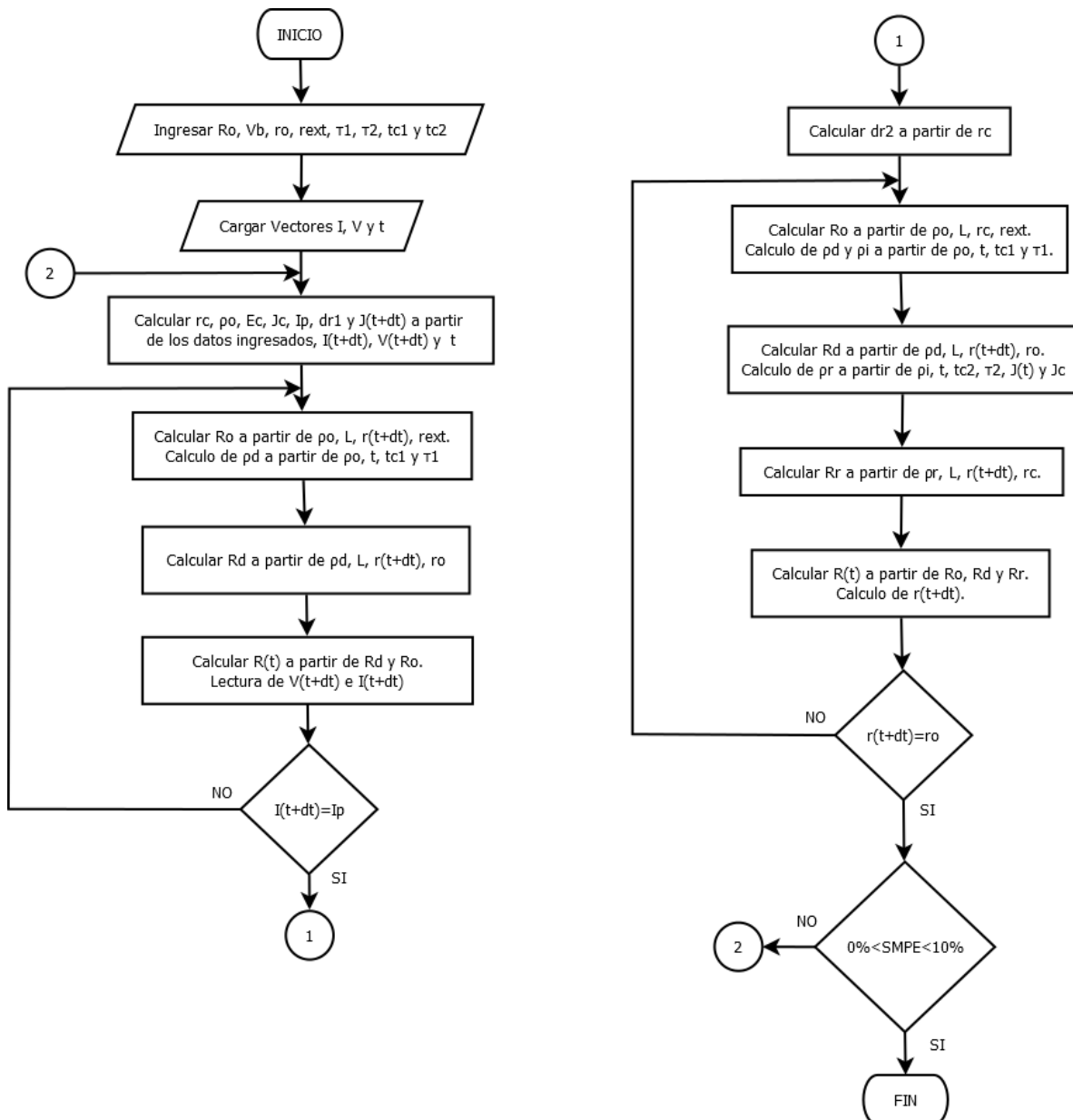


Figura A-1. Diagrama de flujo para el modelo de Liew & Darveniza. Fuente [26] y adaptado por Autores.



## A-2. Modelo físico-térmico propuesto por Cooray *et. al.*

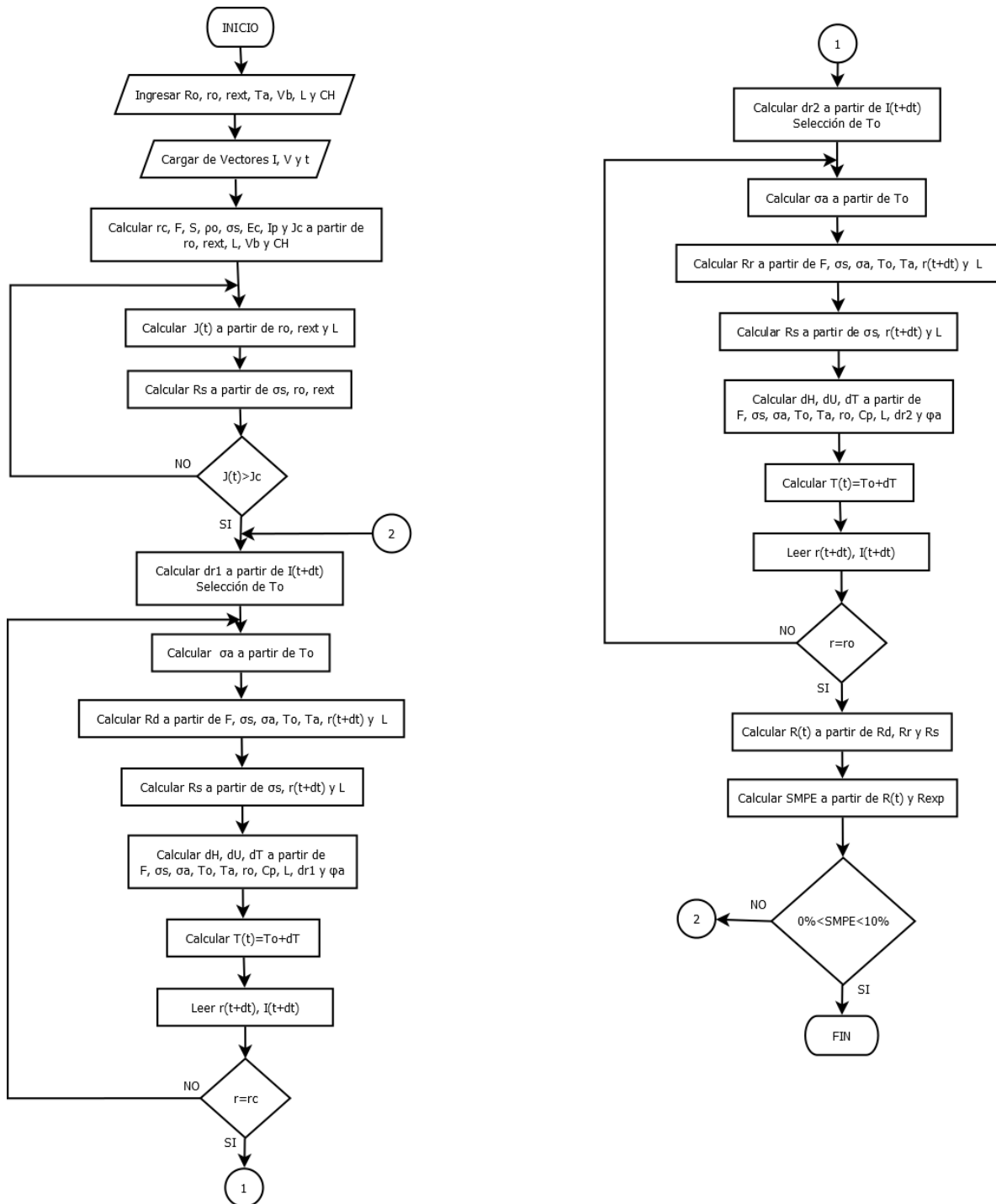


Figura A-2. Diagrama de flujo para el modelo de Cooray *et. al.* Fuente Autores.

Nota: Para los valores de las variables  $F$  y  $S$  del modelo se utilizó la formulación matemática mostrada por Rincón en su trabajo [10], donde se hacen modificaciones del modelo para electrodos coaxiales.





### A-3. Primer modelo analítico propuesto por Pineda

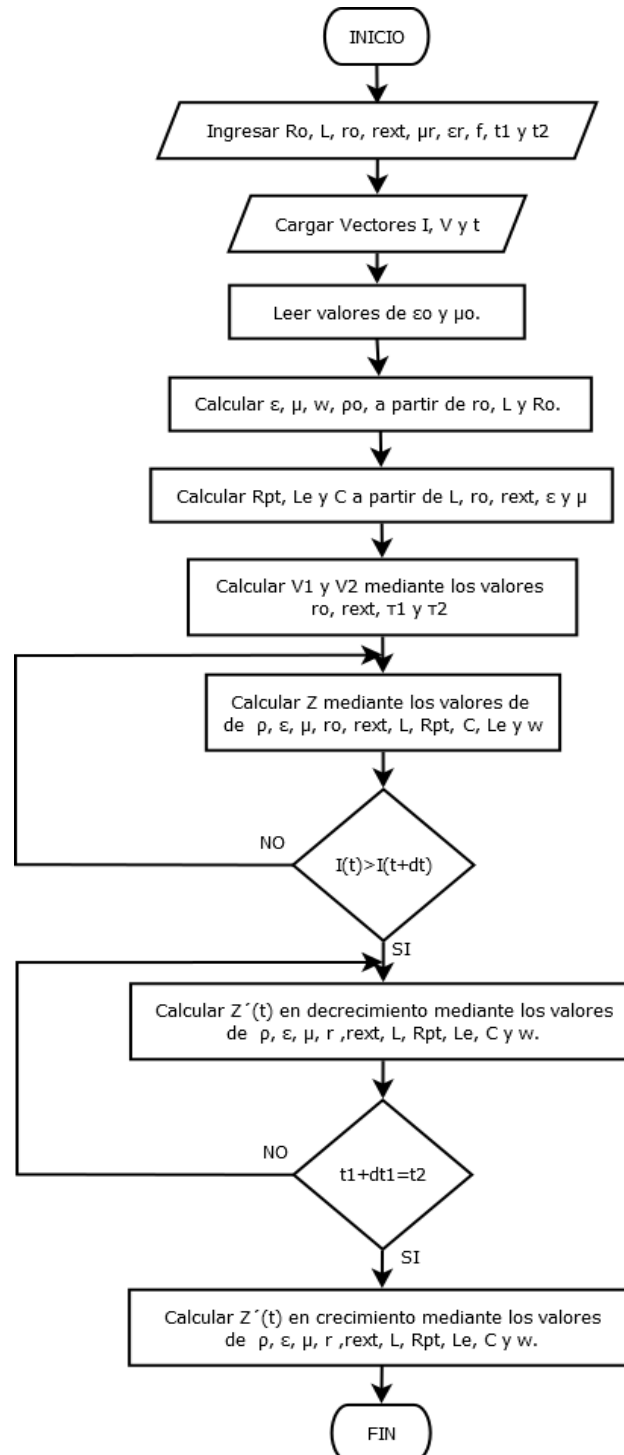


Figura A-3. Diagrama de flujo para el primer modelo analítico de Pineda. Fuente Autores.



Nota: Este modelo depende de parámetros electromagnéticos relacionados con el suelo bajo estudio y de la frecuencia del impulso aplicado al suelo. Para este proyecto de grado, las variables  $a$ ,  $b$ ,  $a'$ , (mencionadas en el trabajo del autor [7]), se denominaron como  $r_o$ ,  $r_{ext}$  y  $r$  respectivamente, con el fin de generalizarlas para todos los modelos expuestos en este documento.

#### A-4. Segundo modelo analítico propuesto por Pineda

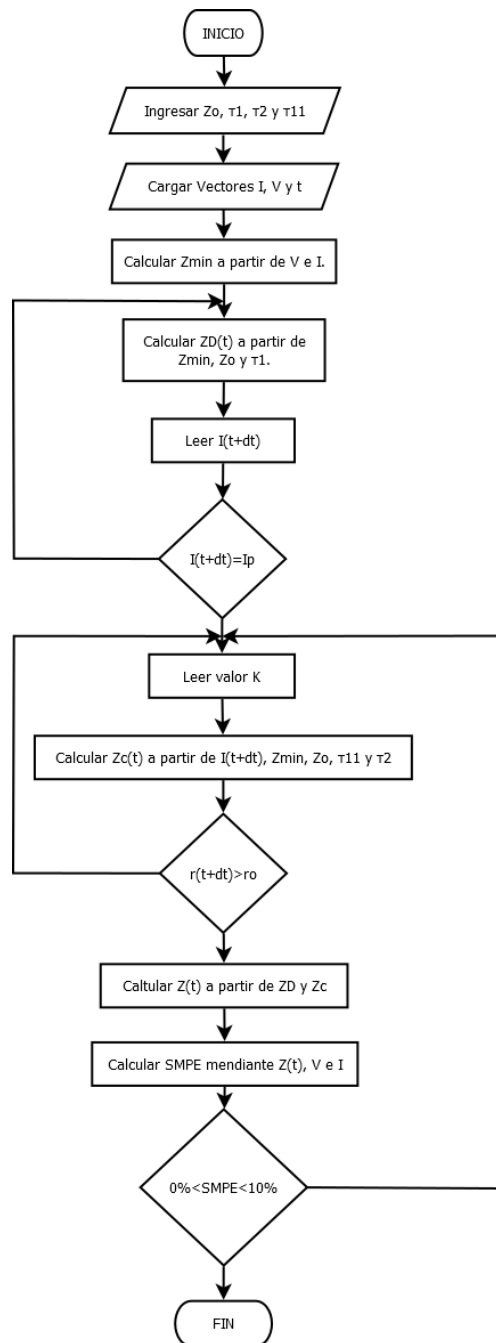


Figura A-4. Diagrama de flujo para el segundo modelo analítico de Pineda. Fuente Autores.



Nota: A diferencia de los demás modelos mencionados, este no depende de las dimensiones de los electrodos. Sin embargo, si tiene en cuenta dentro de sus cálculos, un factor de ajuste llamado  $K$  que permite encontrar el mejor acercamiento entre la relación  $V/I$  calculada  $Z(t)$  y la relación  $V/I$  experimental  $Z_{exp}$ .

#### A-5. Modelo propuesto por Mohamad *et. al.*

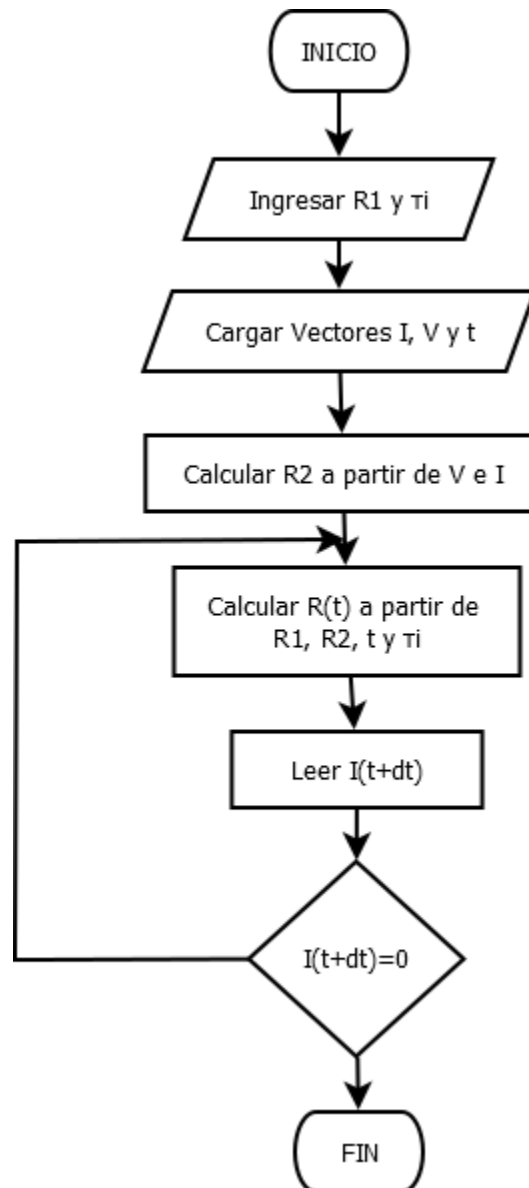


Figura A-5. Diagrama de flujo para el modelo de Mohamad *et. al.* Fuente Autores.



## B. TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestra las tablas de resultados de los indicadores estadísticos para los cinco (5) modelos físicos seleccionados.

### B-1. Modelo dinámico propuesto por Liew & Darveniza

Tabla B.1. Resultados de los indicadores estadísticos obtenidos para el modelo de Liew & Darveniza.

CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
1	11.409	0.974	0.945	0.709
2	6.920	0.967	0.931	0.820
3	5.844	0.991	0.977	0.478
4	19.828	0.977	0.959	0.650
5	6.437	0.981	0.961	0.640
6	24.950	0.972	0.943	0.570
7	1.217	0.995	0.986	0.615
8	2.948	0.993	0.983	0.802
9	40.667	0.964	0.943	0.558
10	3.084	0.988	0.966	0.814
11	5.355	0.979	0.945	0.845
12	52.809	0.973	0.962	0.552
13	1.313	0.976	0.911	0.904
14	2.194	0.989	0.949	0.978
15	8.068	0.935	0.900	0.529
16	5.0012	0.973	0.896	0.871
17	2.283	0.988	0.936	0.902
18	26.799	0.980	0.966	0.661

### B-2. Modelo físico-térmico propuesto por Cooray *et al*

Tabla B.2. Resultados de los indicadores estadísticos obtenidos para el modelo de Cooray *et. al*.

CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
1	50.620	0.845	0.676	1.068
2	32.268	0.900	0.789	0.855
3	18.136	0.956	0.896	1.037
4	287.636	0.835	0.686	0.681
5	55.085	0.793	0.526	0.956
6	101.441	0.936	0.870	0.480



CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
7	14.418	0.913	0.707	1.284
8	21.427	0.903	0.731	0.827
9	190.582	0.830	0.716	0.809
10	23.415	0.907	0.735	0.803
11	36.783	0.866	0.670	1.092
12	1240.279	0.765	0.633	0.388
13	8.254	0.949	0.787	1.024
14	616.328	0.756	0.613	4.531
15	375.955	0.779	0.637	0.898
16	22.872	0.871	0.568	1.076
17	15.611	0.879	0.345	1.200
18	377.924	0.829	0.685	0.539

### B-3. Primer modelo analítico propuesto por Pineda

Tabla B.3. Resultados de los indicadores estadísticos obtenidos para el primer modelo analítico de Pineda.

CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
1	118.298	0.816	0.569	2.890
2	44.334	0.925	0.847	1.757
3	48.702	0.965	0.916	2.409
4	227.766	0.892	0.817	1.669
5	216.626	0.680	0.088	4.373
6	281.587	0.933	0.873	1.372
7	19.729	0.898	0.600	4.401
8	20.577	0.934	0.784	2.282
9	509.454	0.805	0.675	1.950
10	45.126	0.903	0.701	1.836
11	88.115	0.866	0.593	2.841
12	2263.192	0.793	0.699	1.001
13	7.439	0.953	0.807	2.169
14	1.856	0.984	0.940	2.032
15	861.977	0.710	0.499	2.820
16	15.353	0.962	0.845	1.864
17	19.817	0.923	0.571	2.668
18	649.441	0.847	0.724	1.541



#### B-4. Segundo modelo analítico propuesto por Pineda

Tabla B.4. Resultados de los indicadores estadísticos obtenidos para el segundo modelo analítico de Pineda.

CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
1	4.986	0.940	0.921	0.778
2	8.427	0.934	0.867	0.691
3	1.036	0.977	0.958	0.783
4	9.733	0.905	0.831	0.636
5	6.923	0.918	0.938	0.807
6	1.534	0.967	0.953	0.783
7	3.748	0.957	0.900	0.657
8	2.741	0.966	0.923	0.810
9	1.647	0.933	0.925	0.818
10	3.924	0.955	0.917	0.790
11	6.782	0.931	0.839	0.853
12	1.244	0.949	0.954	0.785
13	2.524	0.978	0.934	0.817
14	3.315	0.976	0.880	0.641
15	2.963	0.951	0.970	0.744
16	4.884	0.952	0.818	0.765
17	3.414	0.971	0.838	0.824
18	2.338	0.950	0.949	0.786

#### B-5. Modelo propuesto por Mohamad *et. al.*

Tabla B.5. Resultados de los indicadores estadísticos obtenidos para el modelo de Mohamad *et. al.*

CASO N°	MSPE [%]	CCC	rx <sub>y</sub>	U
1	12.052	0.946	0.899	0.711
2	19.351	0.877	0.726	0.922
3	16.772	0.821	0.611	0.596
4	25.498	0.919	0.853	0.812
5	7.978	0.977	0.951	0.739
6	1772.461	0.613	0.519	2.390
7	9.986	0.935	0.800	0.779
8	12.728	0.908	0.782	0.838
9	19.442	0.893	0.832	0.792
10	12.279	0.921	0.755	0.868
11	13.275	0.937	0.832	0.946
12	26.072	0.914	0.894	0.601



<b>CASO N°</b>	<b>MSPE [%]</b>	<b>CCC</b>	<b>rx<sub>y</sub></b>	<b>U</b>
13	13.371	0.841	0.399	0.964
14	11.830	0.886	0.688	1.024
15	15.955	0.946	0.931	0.536
16	11.513	0.952	0.802	0.935
17	7.327	0.951	0.759	0.979
18	15.530	0.931	0.896	0.681