



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



#### TESIS

#### ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS DOMÉSTICOS EN EL TRATAMIENTO DE LOS POZOS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS ALTOANDINAS

#### PRESENTADA POR:

MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO

#### PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2024

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS DOMÉSTICOS EN EL TRATAMIENTO DE LOS POZOS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS ALTOANDINAS**

AUTOR

**MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO**

RECuento de palabras

**20921 Words**

RECuento de caracteres

**104662 Characters**

RECuento de páginas

**106 Pages**

Tamaño del archivo

**4.8MB**

Fecha de entrega

**May 13, 2024 11:13 AM GMT-5**

Fecha del informe

**May 13, 2024 11:15 AM GMT-5**

● **17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

  
CONSTANZA VILCA CALLATA  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
CIP N° 63278

  
MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO  
CIP. 116625

Resumen



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS  
SUDAMERICANOS DOMÉSTICOS EN EL TRATAMIENTO DE LOS POZOS  
DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS ALTOANDINAS**



**PRESENTADA POR:**

**MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO**  
**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**  
**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....  
Dr. LEONARDO BAYE COLQUEHUANCA

PRIMER MIEMBRO

.....  
Dra. EDITH TELLO PALMA

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
Dr. AMERICO ARIZACA AVALOS

ASESOR DE TESIS

.....  
D.Sc. LEONIDAS VILCA CALLATA

Puno, 29 de enero de 2024

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería.

**TEMA:** Análisis del comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el tratamiento de los pozos de puesta a tierra en zonas altoandinas.

**LÍNEA:** Ingeniería eléctrica.



## DEDICATORIA

*Quiero dedicar el presente trabajo en primer lugar a Dios y a la virgen María de la Candelaria, a mis padres y a mi familia, quienes me dieron fortaleza para poder seguir adelante aun en los momentos difíciles.*

***Marcos José Villanueva cornejo.***



## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a los docentes de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano, quienes fueron la parte fundamental para el desarrollo de los estudios de doctorado, también a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en la realización del presente trabajo.*

***Marcos José Villanueva cornejo.***



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
índice general	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ACRÓNIMOS	x
RESUMEN	1
ABSTRACT	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
INTRODUCCIÓN	3
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
1.1 Marco teórico	6
1.1.1 Descargas eléctricas	6
1.1.2 Tipos de rayos	7
1.1.3 Tipos de sobretensión por rayo	12
1.1.4 Los sistemas de protección contra el rayo	12
1.1.5 Secuencia temporal de los rayos	13
1.1.6 Resistividad	14
1.1.7 Conductividad eléctrica de los suelos	16
1.1.8 Método de resistencia eléctrica (ERM)	17
1.1.9 Resistividad aparente	19
1.1.10 Modelización del suelo	19
1.1.11 El sistema de puesta a tierra	20
1.1.12 Electrodo a tierra	21
1.1.13 Técnicas de puesta a tierra	22
1.1.14 Compuestos mejoradores	22
1.1.15 Varilla accionada químicamente	24
1.1.16 Varilla accionada no metálica	25
1.1.17 Representación del sistema de puesta a tierra	26
1.1.18 Representación del cuerpo humano	26
	iii



1.1.19	Umbral de supervivencia	27
1.1.20	Estiércol de camélidos sudamericanos	28
1.2	Antecedentes	28
1.2.1	Internacionales	28

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1	Identificación del problema	32
2.1.1	Descripción de la realidad problemática	33
2.2	Enunciados del problema	34
2.2.1	Problema general	34
2.2.2	Problemas específicos	34
2.3	Justificación	34
2.4	Objetivos	36
2.4.1	Objetivo General	36
2.4.2	Objetivos Específicos	36
2.5	Hipótesis	36
2.6.1	Hipótesis General	36
2.6.2	Hipótesis Específicas	37

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudio	38
3.2	Población	38
3.3	Muestra	39
3.4	Método de investigación	39
3.4.1	Tipo de investigación	39
3.4.2	El método propuesto	39
3.5	Descripción detallada del método por objetivos específicos	40
3.5.1	Resistividad eléctrica del terreno	40
3.5.2	Resistencia del pozo a tierra tratado	43

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Resultados	47
4.1.1	Resistividad eléctrica del terreno	47
4.1.2	Resistencia del pozo a tierra tratado	64



4.1.3	Contrastación de hipótesis	67
4.2	Discusión	72
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXOS	86



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Resistividad del material del subsuelo	15
2. Medición de la resistividad perfil 1	49
3. Resistividad del perfil 1	51
4. Medición de la resistividad perfil 2	52
5. Resistividad del perfil 2	54
6. Medidas de la resistencia del pozo sin tratamiento	65
7. Medidas de la resistencia del pozo con tratamiento	66
8. p valor hipótesis 1	69
9. Datos de las mediciones de resistencia	70
10. Valores críticos de la distribución t de Student	71
11. Valor de estadístico t, resistencia	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Diagrama esquemático de los mecanismos de impacto del rayo	7
2. Rayos descendentes.	9
3. Rayo negativo ascendente	10
4. Rayo positivo ascendente	11
5. Secuencia de los rayos	13
6. Distribución del flujo de corriente en suelo homogéneo	17
7. Toma de tierra vertical	18
8. Densidad de corriente a través de la varilla en un suelo de dos capas	20
9. Electrodo de puesta a tierra de varilla de hormigón conductor de la electricidad	24
10. Varilla de accionamiento químico	25
11. Varilla de accionamiento no metálica	26
12. Representación del cuerpo humano	27
13. Sullcanaca	38
14. Método Wenner de cuatro polos	41
15. Grafica de Sunde	42
16. Modelo del pozo a tierra	44
17. Método de caída de potencial	45
18. Potenciales de la superficie del suelo para distintas distancias "X"	46
19. Conexión de los cables a los terminales y electrodos	48
20. Resistividad aparente vs distancia perfil 1	55
21. Gráfico de Sunde perfil 1	56
22. Resistividad aparente perfil 1	57
23. Valores de resistividad aparente perfil 1 con IP12WIN	58
24. Resistividad aparente vs distancia perfil 2	59
25. Gráfico de Sunde perfil 2	60
26. Resistividad aparente perfil 2	61
27. Valores de resistividad aparente perfil 2 con IP12WIN	62
28. Modelado del terreno con IP12WIN	62
29. Conexión medida de resistencia	64
30. Resistencia del pozo sin tratar	65
31. Tratamiento del pozo a tierra	66
	vii



32. Resistencia del pozo con tratamiento

67



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Matriz de consistencia	86
2. Certificado de calibración	87
3. Panel Fotográfico	91



## ACRÓNIMOS

a	: Distancia entre electrodos
A	: Amperios
b	: Profundidad de enterramiento de los electrodos
CC	: Corriente continua
Cu	: Cobre
ERM	: Método de resistencia eléctrica
h	: Profundidad del nivel superior
I	: Intensidad de corriente
kA	: Kiloamperios
K	: Coeficiente geométrico
L	: Longitud
LIA	: Línea Artificial Infinita
m	: Metro
mm	: Milímetros
ms	: Milisegundos
MV	: Mega voltios
Ohm	: Ohmios
PSCAD	: Diseño asistido por computador de sistemas eléctricos
r	: Radio
TLC	: Condensadores de dos capas
V	: Voltios
$\Delta U$	: Diferencia de potencial resultante
$\rho$	: Resistividad aparente



## RESUMEN

En zonas altoandinas del altiplano, durante la época de lluvias se presentan tormentas eléctricas de gran intensidad, este fenómeno atmosférico ocasiona pérdidas de vidas humanas, animales y daños a los equipos; la manera de protección contra estos fenómenos naturales es la instalación de pararrayos, estos equipos, están conectados a un sistema de puesta a tierra que es el que absorbe la descarga de energía y el mismo debe presentar una resistencia baja. El objetivo de la investigación fue realizar el estudio de la resistividad eléctrica del terreno y analizar el comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el mejoramiento de la resistencia del pozo de puesta a tierra. La investigación fue no experimental con un enfoque cuantitativo. Como resultado, se ha evaluado la resistividad del terreno en dos direcciones; en el primer perfil se ha tenido una resistividad aparente de 150.69 Ohmios por metro; mientras que, para el segundo perfil se tiene una resistividad de 144.77 Ohmios por metro. En cuanto al tratamiento del pozo a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos se tiene como resultado una resistencia de 2.4 Ohmios; mientras que, para el pozo sin tratamiento se tiene una resistencia de 40 Ohmios, lo que representa una mejora significativa en la resistencia del pozo a tierra con tratamiento, demostrado mediante la prueba de hipótesis aceptando la hipótesis alterna. Se concluye que el estiércol de los camélidos sudamericanos utilizado en el tratamiento de los pozos a tierra mejora notablemente su resistencia en comparación con el pozo sin tratamiento.

**Palabras clave:** Camélidos sudamericanos, estiércol, pozo a tierra, resistencia, resistividad.

## ABSTRACT

In the high Andean zones of the Peruvian altiplano, during the rainy season there are intense electrical storms, this atmospheric phenomenon causes loss of human lives, animals and damage to equipment; the way to protect against these natural phenomena is the installation of lightning rods, this equipment is connected to a grounding system that absorbs the energy discharge and it must have a low resistance. The objective of the research was to study the electrical resistivity of the ground and to analyse the behaviour of domestic South American camelid manure in improving the resistance of the grounding well. The research was non-experimental with a quantitative approach. As a result, the resistivity of the soil was evaluated in two directions; in the first profile the apparent resistivity was 150.69 Ohms per metre, while in the second profile the resistivity was 144.77 Ohms per metre. As for the treatment of the ground well with South American camelid dung, we have as a result a resistance of 2.4 Ohms, while for the well without treatment we have a resistance of 40 Ohms, which represents a significant improvement in the resistance of the ground well with treatment, demonstrated by the hypothesis test accepting the alternative hypothesis. It is concluded that the manure of South American camelids used in the treatment of the earth wells significantly improves its resistance compared to the untreated well.

**Keywords:** Dung, earth well, resistance, resistivity, South American camelids.



Dra. Ing. Ruth A. Moza Duman  
CIP. 90553

## INTRODUCCIÓN

En las zonas altoandinas del altiplano Peruano, en épocas de presencia de lluvias también se presentan tormentas eléctricas de gran intensidad que traen consigo las descargas eléctricas conocidas como rayos, este fenómeno atmosférico ocasiona pérdidas de vidas humanas, animales y daños a los equipos; hoy en día la manera de protección contra estos fenómenos naturales es la instalación de equipos pararrayos, estos equipos a su vez, están conectados a un sistema de pozo a tierra que es el que absorbe la descarga de energía, siempre y cuando su resistencia este en valores mínimos para que puedan disipar estas descargas.

Los sistemas de puesta a tierra tienen como principal objetivo hacer del suelo un camino de baja impedancia, asegurando la integridad de personas y equipos, así como para garantizar el funcionamiento continuo del sistema eléctrico (Gonçalves et al., 2019). El sistema de puesta a tierra de una instalación debe permitir el flujo de corrientes estacionarias o de defecto a tierra sin sobrepasar los límites de funcionamiento del equipo ni afectar a la continuidad del servicio; además, y lo que es más importante, debe ofrecer protección a las personas contra el peligro de descargas eléctricas críticas (Datsios y Mikropoulos, 2017).

Las características de la red de puesta a tierra incluyen el material del electrodo de puesta a tierra y la resistividad del suelo del electrodo de puesta a tierra (Hu et al., 2021). Por lo tanto, para lograr una protección adecuada, es esencial aplicar procedimientos técnicos para garantizar no sólo que los valores de resistencia del suelo medidos durante la aplicación del sistema de puesta a tierra estén dentro de los límites establecidos por las normas, sino también que se mantengan dentro de estos límites en todas las estaciones del año (Luiz et al., 2015).

Los sistemas de protección contra el rayo requieren un sistema de puesta a tierra eficaz para minimizar las sobretensiones directas e inducidas por el rayo de los servicios y estructuras cercanos. Según las normas, el rendimiento del sistema de puesta a tierra se evalúa midiendo la resistencia a tierra a baja frecuencia, que debe estar por debajo del nivel de seguridad definido (Choi y Lee, 2012). Para cumplir las normas de seguridad eléctrica, la resistencia a tierra de un sistema de puesta a tierra debe ser lo suficientemente baja, lo cual es especialmente difícil de alcanzar en entornos complicados (Trifunovic y Kostic, 2016). El valor de la resistencia de puesta a tierra viene determinado

principalmente por las características de la propia red de puesta a tierra, el entorno y la corriente de defecto (Hu et al., 2021).

El diseño y cálculo del sistema de puesta a tierra debe verificar ciertos requisitos contenidos en normas obligatorias para la resistencia de puesta a tierra y también para los potenciales de paso y contacto; periódicamente, tanto la resistencia de puesta a tierra como los potenciales mencionados se miden para verificar que se encuentran dentro de los límites de la norma, ya que todos estos parámetros del sistema de puesta a tierra pueden modificarse por diversos motivos (Faleiro et al., 2022).

Conseguir valores bajos de impedancia a través de la disposición de los electrodos de tierra es importante cuando se trata del comportamiento frente al rayo de los sistemas eléctricos (Caetano et al., 2018). El diseño adecuado de los sistemas de protección contra el rayo es un requisito básico para garantizar la seguridad de las personas y evitar pérdidas culturales, económicas o sociales. La resistencia de puesta a tierra, que refleja la capacidad de disipación de corriente de los electrodos de puesta a tierra de la estructura, se utiliza como un índice importante para evaluar en la mayoría de los casos eléctricos (Z. Zhang et al., 2020). Su valor recomendado o máximo permitido varía entre 10 Ohmios para la protección contra rayos y 0,1 Ohmios para lugares donde los dispositivos de protección deben funcionar muy rápidamente. Para garantizar que se diseña un sistema de puesta a tierra adecuado, las resistencias de puesta a tierra deben estimarse en una fase temprana del diseño; por lo tanto, los métodos simples y las fórmulas orientadas al diseñador para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra teórica de varios tipos de sistemas de puesta a tierra se dan en las normas y manuales (Trifunovic y Kostic, 2016).

Como componente principal del dispositivo de puesta a tierra de las instalaciones, los electrodos de puesta a tierra enterrados en el suelo pueden disipar rápidamente la corriente del rayo, reducir la sobretensión de la instalación y proteger la seguridad de las personas (Z. Zhang et al., 2020).

La presente investigación comprende cuatro capítulos; en el primer capítulo se realizó la revisión de los temas relacionados e investigaciones anteriores; lo que, consta del marco teórico y los antecedentes relacionados; en el segundo capítulo se establece y formula el problema de la investigación, de igual modo, la justificación, los objetivos y las hipótesis de la investigación; en el tercer capítulo se presenta el lugar de estudio, la



población, la muestra, los métodos de investigación por cada uno de los objetivos específicos; en el cuarto capítulo se muestra los resultados de la investigación conforme lo planteado por cada objetivo específico, principalmente se analiza el comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el tratamiento de los pozos de puesta a tierra, se desarrolla la discusión, y se exponen las conclusiones y recomendaciones referidas al tema de investigación.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

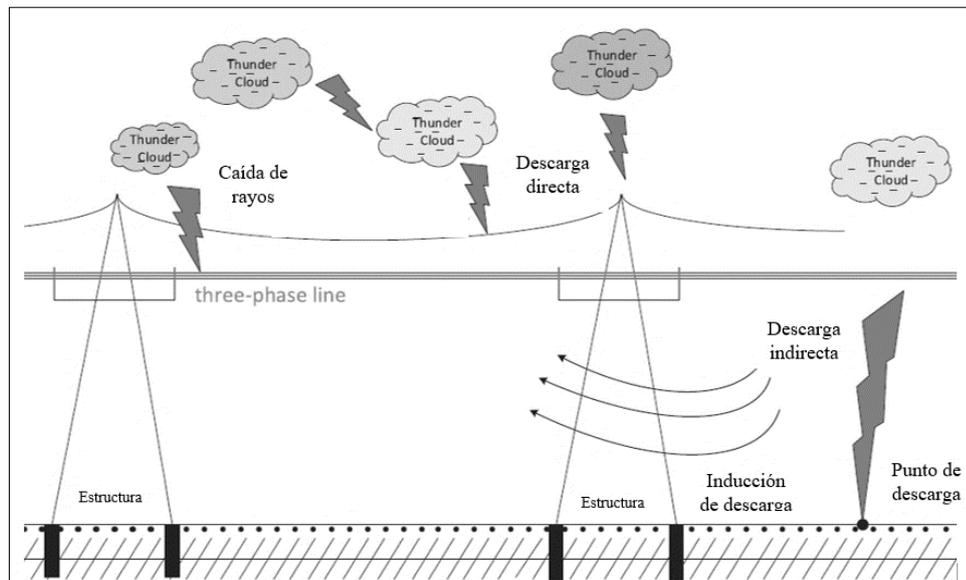
##### 1.1.1 Descargas eléctricas

Los rayos se definen como la transferencia de cargas eléctricas de una nube a otra o de las nubes a la tierra. Las altas intensidades del campo eléctrico resultante son capaces de provocar la ruptura dieléctrica del aire y la subsiguiente aparición de rayos. Uno de los principales problemas a los que se enfrentan las redes eléctricas son las sobretensiones causadas por los rayos, que provocan interrupciones del suministro eléctrico y el deterioro de los equipos. Hay dos categorías principales de rayos: directos e indirectos. Las sobretensiones resultantes de los impactos indirectos son menores que las de los impactos directos, que son más graves y causan daños más serios (Zalhaf et al., 2022).

Según la norma IEC 62305-1 de 2010, la corriente de rayo varía entre 5 kA y 200 kA en un rayo típico. Los impactos directos de los rayos son bien conocidos, tales como daños materiales, incendios, ondas de choque y pérdida de vidas humanas. Tras el impacto directo, los efectos secundarios del rayo provocan cambios bruscos de tensión destructivos para los dispositivos eléctricos y electrónicos (Mansoor et al., 2020).

**Figura 1**

*Diagrama esquemático de los mecanismos de impacto del rayo*



*Nota.* Tomado de “Evaluation of lightning overvoltage at neutral point of HVDC converter transformer based on EMTP”, por Z. Hu, Y. Han, P. Yang, C. Wang y A.S. Zalhaf, 2022. *Energy Reports*, 8 (2022), p. 275, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.194>. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

La sobretensión causada por un rayo es un fenómeno muy destructivo que se produce aleatoriamente en la atmósfera entre las nubes o entre las nubes y el suelo. Aunque el índice de incidencia de sobretensiones por rayos en los sistemas de distribución no es muy elevado, la cantidad de energía contenida en un rayo es muy elevada, por lo que la sobretensión provocada por un rayo en un sistema puede ser suficiente para causar un problema grave. Debido a que la descarga de un rayo en la línea de distribución puede causar un problema grave como un apagón, la línea de distribución debe protegerse instalando pararrayos con una separación adecuada y dimensionando correctamente la resistencia de puesta a tierra de los cables aéreos de tierra para evitar estos problemas. La cantidad de descargas de rayos depende, en gran medida, de su altura total y del nivel cerámico de la zona (Lim et al., 2015).

### 1.1.2 Tipos de rayos

En la naturaleza, se forman dos tipos de nubes que son nubes con carga positiva y nubes con carga negativa. En el proceso del rayo primero, la carga en la nube continúa acumulándose, donde el aire actúa como aislante, la acumulación

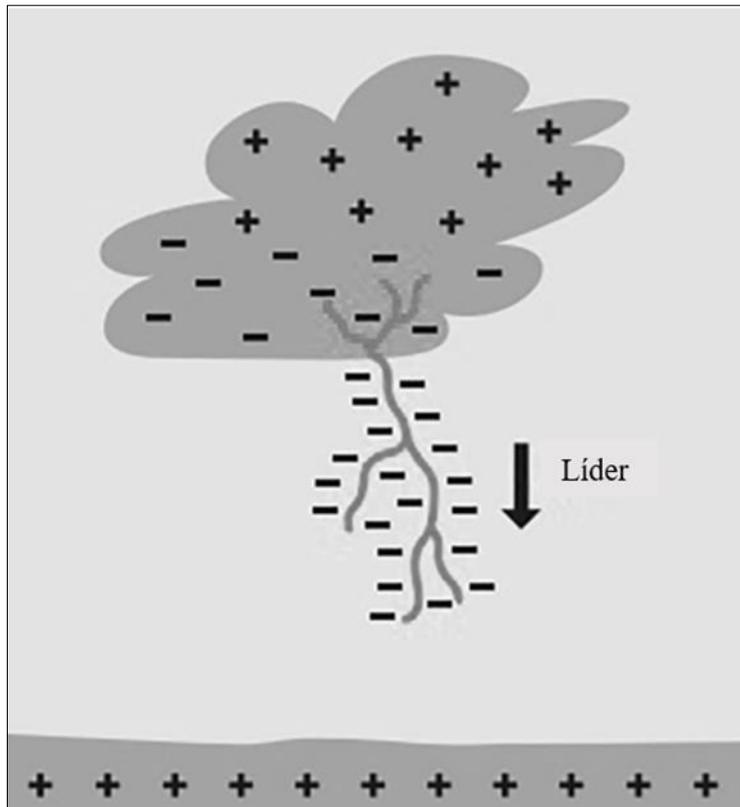


de carga dentro de la nube, puede ser positiva, negativa o ambas. A continuación, cuando la diferencia de tensión supera la rigidez dieléctrica del aire, se inicia el destello. se inicia y la carga acumulada se conectará a tierra. La mayoría de los rayos que caen fluyen dentro de las formaciones nubosas, es decir, los rayos fluyen de nubes cargadas positivamente a nubes negativas. No obstante, en algunos casos, algunas de las cargadas negativamente siguen descargando las cargas negativas hacia el suelo a través de la trayectoria del rayo. Esto se conoce como rayos negativos descendentes. El rayo positivo descendente es más grave y peligroso que el rayo negativo descendente (Mansoor et al., 2020).

Así, las descargas de tierra se dividen en cuatro categorías distintas: descendentes (positivas y negativas) y ascendentes (positivas y negativas); los rayos descendentes negativos representan alrededor del 90% de los rayos nube-tierra, mientras que alrededor del 10% de las descargas nube-tierra son rayos positivos descendentes. Por el contrario, las descargas de rayos ascendentes se inician desde objetos altos de más de 100 m de altura u objetos más cortos situados en terrenos elevados, como las cimas de las montañas (Malcolm y Aggarwal, 2015).

## Figura 2

### *Rayos descendentes*

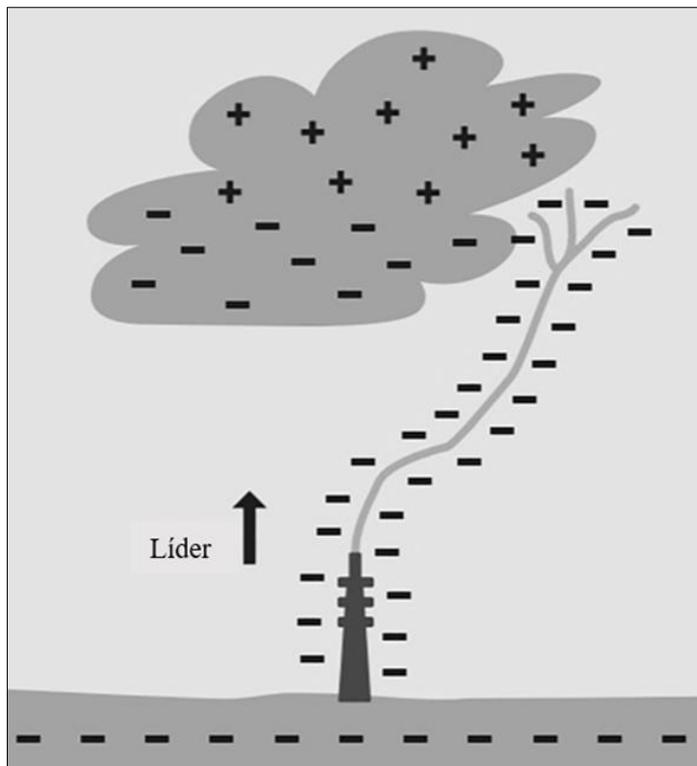


*Nota.* Tomado de “Throwing light on lightning”, por V.M. Mansoor, P. Nagaveni, A. Amudha, S. Divyapriya, G. Emayavaramban, M. Siva Ramkumar y M. SivaramKrishnan, 2020. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021), p. 2573, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.500>. All rights reserved. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirec.

Cuando la dirección del rayo es de nube a tierra, se conoce como como un rayo descendente. Por el contrario, cuando el rayo parte del suelo y llega a la nube, se denomina rayo ascendente. Los rayos descendentes se producen en superficies relativamente planas o cerca de pequeños edificios (Mansoor et al., 2020).

### Figura 3

#### *Rayo negativo ascendente*

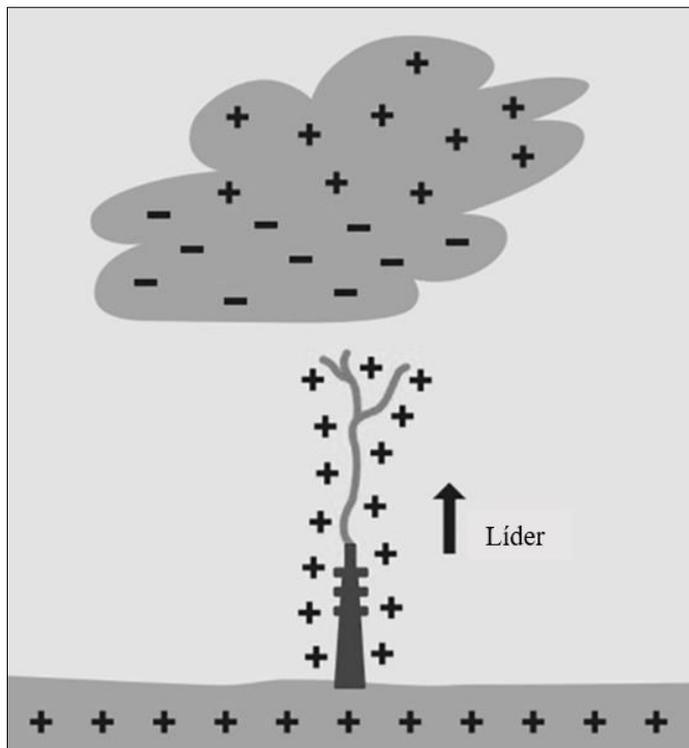


*Nota.* Tomado de “Throwing light on lightning”, por V.M. Mansoor, P. Nagaveni, A. Amudha, S. Divyapriya, G. Emayavaramban, M. Siva Ramkumar y M. SivaramKrishnan, 2020. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021), p. 2575, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.500>. All rights reserved. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirect.

El segundo grupo de rayos se denomina rayos ascendentes. Los rayos ascendentes se producen en una zona en la que hay estructuras altas que están muy expuestas. Por ejemplo, torres de transmisión de alta tensión, torres de comunicación y turbinas eólicas. En los rayos ascendentes, la carga eléctrica se acumula en los objetos expuestos. Los grupos de nubes cargadas inducen las cargas opuestas en las estructuras altas cuando el campo eléctrico en la punta de la estructura alta supera la rigidez dieléctrica del aire, se produce el impacto del rayo. En este caso, el tipo de carga de la nube determina si el rayo se dirige hacia arriba o hacia abajo, se produce un golpe negativo o se produce un golpe positivo ascendente (Mansoor et al., 2020).

## Figura 4

### *Rayo positivo ascendente*



*Nota.* Tomado de “Throwing light on lightning”, por V.M. Mansoor, P. Nagaveni, A. Amudha, S. Divyapriya, G. Emayavaramban, M. Siva Ramkumar y M. SivaramKrishnan, 2020. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021), p. 2575, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.500>. All rights reserved. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirec.

La descarga del rayo puede representarse mediante una forma de onda con tiempos de subida y bajada. Hay cuatro parámetros que definen el rayo: amplitud, tiempo de frente de onda, tiempo de cola de onda y la polaridad, que puede ser positiva o negativa. La amplitud de la carrera del rayo y la duración del frente, tienen la mayor influencia en el fenómeno de sobretensión transitoria; cuanto menor sea la duración del tiempo frontal, mayor será la sobretensión en el sistema eléctrico durante los rayos. Por el contrario, la amplitud del rayo y la duración del tiempo de cola determinan el daño térmico sufrido por los componentes del sistema eléctrico y la cantidad de energía absorbida por los descargadores de sobretensiones (Malcolm y Aggarwal, 2015).

### 1.1.3 Tipos de sobretensión por rayo

La sobretensión por rayo, también conocida como sobretensión externa, está causada por la caída de rayos o la inducción de rayos procedentes de la atmósfera sobre equipos o edificios de las redes eléctricas. La amplitud de la tensión de un rayo puede alcanzar los 100 MV, y la amplitud de la corriente puede ser de cientos de miles de amperios. Por lo tanto, es extremadamente dañino para los equipos del sistema eléctrico y para las personas (Z. Hu et al., 2022).

### 1.1.4 Los sistemas de protección contra el rayo

Para proteger el sistema contra las sobretensiones de los rayos, se utilizan cables apantallados y descargadores de sobretensión. En caso de sobretensión, lo que puede provocar fallos de aislamiento en los equipos. En consecuencia, la instalación de descargadores de sobretensión será eficaz para reducir los fallos de aislamiento y las interrupciones por rayos, es decir, para mejorar la fiabilidad de la red. El descargador de sobretensiones es un dispositivo que proporciona una trayectoria de menor impedancia en caso de rayo. Sin embargo, proporciona una vía de alta impedancia en condiciones de carga normales. Para diseñar los pararrayos, es importante estudiar las características de los rayos (Mansoor et al., 2020). La característica tensión corriente de un descargador de sobretensiones es no lineal, es decir, la tensión en los terminales aumenta por encima de un cierto límite proporcionalmente menos que el aumento de la corriente de sobretensión (Hosseini et al., 2015).

Los sistemas de protección contra el rayo se componen de descargadores de sobretensiones que desvían las descargas atmosféricas a tierra, limitando al mismo tiempo la tensión en los equipos a los que protegen. Este límite de tensión es la suma de la tensión de descarga de los pararrayos y la tensión inducida desarrollada por la corriente de descarga entre los conductores de línea y tierra de los pararrayos. Los sistemas de protección contra rayos pueden emplearse en diversos análisis y resolver diferentes problemas, como la evaluación de las tensiones inducidas por rayos directos e indirectos, la reducción de las paradas imprevistas y la definición de la ubicación y el número de pararrayos que deben instalarse para proteger un sistema de energía eléctrica. Además, los sistemas de protección contra el rayo pueden utilizarse para determinar la influencia de la

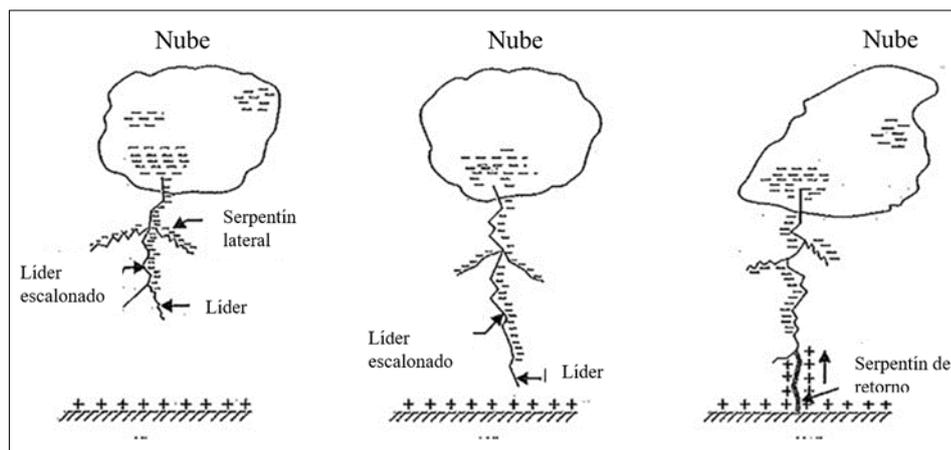
ubicación de los descargadores de sobretensiones en diferentes fases de un sistema, la aplicación de cables de protección, el uso de descargadores de sobretensiones con o sin vía de chispas, el análisis del nivel de paradas de las líneas de transmisión y distribución y el rendimiento de absorción de energía de los descargadores de sobretensiones (M. A. Araújo et al., 2015).

### 1.1.5 Secuencia temporal de los rayos

En un relámpago, a simple vista se observa un destello. Sin embargo, un relámpago puede estar formado por varios relámpagos. Por ejemplo, la Figura 5 muestra un evento de iluminación con 3 rayos de retorno. El tiempo de duración entre dos rayos de retorno consecutivos es de unos 30 ms. Por lo tanto, nuestro ojo puede no ser capaz de diferenciar los diferentes rayos de retorno, si la duración entre dos trazos de retorno consecutivos es prolongada, lo observaremos como parpadeo. A medida que el primero se acerca al suelo, la carga opuesta se acumulará en la superficie del suelo o en estructuras altas y formará un camino para las cargas que se mueven hacia arriba. El medio en el que se produce esta descarga se conoce como carrera de retorno, que es la parte más luminosa del rayo (Mansoor et al., 2020).

**Figura 5**

*Secuencia de los rayos*



*Nota.* Tomado de “Throwing light on lightning”, por V.M. Mansoor, P. Nagaveni, A. Amudha, S. Divyapriya, G. Emayavaramban, M. Siva Ramkumar y M. SivaramKrishnan, 2020. *Materials Today: Proceedings* 37 (2021), p. 2573, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.500>. All rights reserved. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirec.

### 1.1.6 Resistividad

Las investigaciones de la resistividad eléctrica del suelo son importantes para diversas aplicaciones industriales, por ejemplo, la estimación de la corrosión de las instalaciones subterráneas, el análisis de los sistemas de puesta a tierra de distribución de energía, el diseño de puesta a tierra segura. La resistividad eléctrica de los geomateriales ha atraído la atención de los investigadores desde 1912, cuando Schlumberger utilizó las mediciones de resistividad eléctrica para caracterizar el subsuelo. Desde entonces, la necesidad de comprender el comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos se ha extendido a diferentes áreas, como el diseño de sistemas eléctricos de puesta a tierra, la monitorización del contenido de humedad para aplicaciones agrícolas, la consolidación y el drenaje de suelos por electroósmosis y la evaluación de la homogeneidad del revestimiento de arcilla compactada (Alsharari et al., 2020).

La resistividad eléctrica es un método geofísico muy utilizado en la práctica. Se considera una herramienta rápida y fiable para clasificar y predecir las propiedades físicas de los materiales en función de la facilidad de paso de la corriente eléctrica. Las rocas y los minerales pueden considerarse buenos conductores cuando el valor de la resistividad se sitúa entre 1 y 10 Ohm-m. Los no conductores pueden tener valores de resistividad superiores a 100 Ohm-m. Los minerales y rocas de conductividad intermedia varían normalmente entre estos dos rangos. En la resistividad eléctrica influyen muchos factores, como el contenido de humedad, la temperatura y la compactación. La química de los fluidos, la porosidad y los vacíos de aire son algunos de estos factores. La salinidad y la composición química pueden afectar a las mediciones de la resistividad eléctrica. Debido a estos numerosos factores, la resistividad eléctrica rara vez es única para una formación concreta. La superposición de rangos es muy común. En general, puede observarse que las rocas ígneas presentan los mayores valores de resistividad, a diferencia del material sedimentario, que normalmente es de baja resistividad (Dafalla y AlFouzan, 2012). La caracterización eléctrica del suelo se da mediante la realización de mediciones de resistividad eléctrica de superficie y, posteriormente, traduciendo estos datos del suelo subterráneo (Sudha et al., 2009).

**Tabla 1***Resistividad del material del subsuelo*

Material del subsuelo	Límite inferior	Límite superior
Arcillas	1	100
Arena	4	800
Marga	5	50
Marga	3	70
Pizarras consolidadas	20	2000
Grava/Conglomerado	2000	10 <sup>4</sup>
Arenisca de grano grueso	10	9.6 x 10 <sup>4</sup>
Lutolita	1	1.5 x 10 <sup>4</sup>
Arenisca	50	8.0 x 10 <sup>3</sup>
Caliza	80	1.0 x 10 <sup>3</sup>

*Nota.* Adaptado de “Influence of Physical Parameters and Soil Chemical Composition on Electrical Resistivity: A Guide for Geotechnical Soil Profiles”, por M. Dafalla y F. AlFouzan, 2012. *International Journal of Electrochemical Science* 7(2012), p. 3192, [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)13946-0](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13946-0). [www.electrochemsci.org](http://www.electrochemsci.org)

La resistividad eléctrica del suelo se ha aplicado ampliamente a muchas investigaciones geotécnicas y de ingeniería para obtener el perfil del suelo cerca de la superficie. En particular, la monitorización de la resistividad de corriente continua (CC) se ha utilizado ampliamente para correlacionar los cambios de resistividad del subsuelo con las propiedades del suelo. La resistividad eléctrica del suelo es un parámetro muy importante que puede utilizarse determinar las características específicas de un perfil de suelo en la superficie como el tipo de suelo, la densidad seca de la compactación, la salinidad y la porosidad del suelo (Islam y Chik, 2013).

Muchos factores pueden afectar fácilmente a la impedancia de la tierra, como por ejemplo la geometría del electrodo de tierra, las propiedades del suelo, el número de picas o incluso el clima. La resistividad del suelo puede variar desde unos pocos ohmios en suelos arcillosos hasta miles de kilo-ohmios en suelos rocosos. Además, las estaciones de lluvias y nevadas han registrado menos resistividad del suelo que las estaciones secas y ventosas. Debido a estos hechos, a menudo es difícil conseguir la deseada y garantizar la seguridad de los equipos y las personas (Camara et al., 2020).

La resistividad equivalente del suelo depende de factores de corrección que deben estimarse para calcular la impedancia de puesta a tierra armónica de las picas enterradas en suelos estratificados. Otra característica importante del suelo es la variación de frecuencia de los parámetros eléctricos del suelo. Estos parámetros eléctricos se ven fuertemente afectados por la frecuencia debido a los diversos procesos de polarización en las moléculas del suelo, especialmente a altas frecuencias y en suelos muy resistivos (Araújo et al., 2023).

### **1.1.7 Conductividad eléctrica de los suelos**

En los suelos granulares gruesos, la resistividad eléctrica se ve afectada por la porosidad del suelo y también por naturaleza del fluido poroso. La estructura del suelo puede influir en el flujo eléctrico porque la disposición de los poros puede proporcionar diferentes caminos para la corriente. En los suelos de grano fino, sin embargo, depende también de los minerales presentes, ya que la corriente eléctrica puede fluir a través de las superficies cargadas de los minerales arcillosos. Según estudios recientes, el flujo en las arcillas debido al potencial eléctrico tiene en cuenta la conductancia del agua de los poros, así como la conductividad de la superficie de las partículas por la tortuosidad creada por la estructura del suelo tras la compactación.

La caracterización del subsuelo y la determinación de su resistencia son requisitos previos para el diseño de ingeniería. La caracterización eléctrica del suelo se da mediante la realización de mediciones de resistividad eléctrica de superficie y, posteriormente, traduciendo estos datos del suelo subterráneo (Sudha et al., 2009).

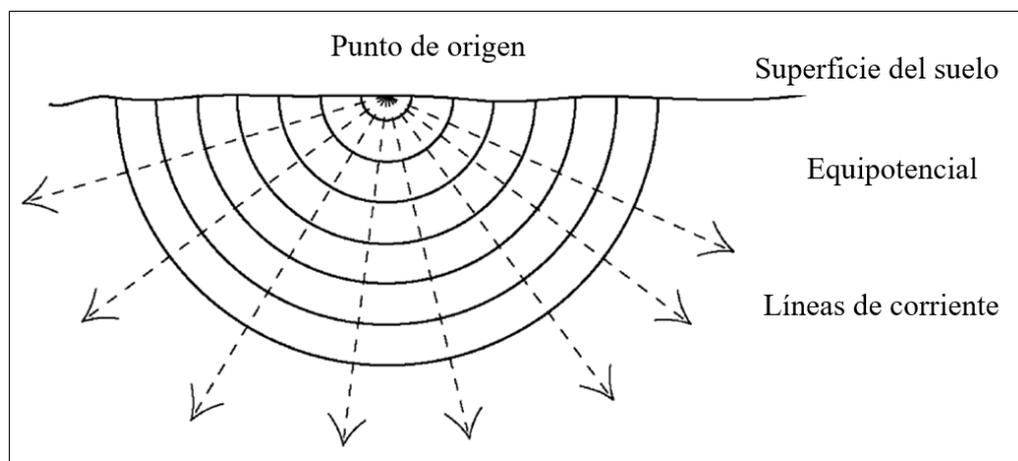
La estructura de las arcillas compactadas suele poder clasificarse en floculada y dispersa dependiendo del intervalo de compactación elegido. La compactación en el lado seco contiene menos agua y por lo tanto las fuerzas de atracción entre los bordes y las caras de las partículas de arcilla hacen que la estructura sea floculada. Cuando se realiza en el lado húmedo, el agua reduce la repulsión entre las caras de las partículas de arcilla y da lugar a una estructura dispersa. Del mismo modo, los materiales granulares, para las arcillas compactadas el agua en los poros más grandes proporciona el para el flujo de

electrones, sin embargo este mecanismo de transporte ocurre mientras hay continuidad de la fase líquida (Gingine et al., 2016).

En particular, los métodos eléctricos son interesantes porque se han establecido varias relaciones entre las propiedades del suelo y la resistividad eléctrica, entre los estudios recientes, se ha demostrado que la resistividad eléctrica se ve afectada por el contenido de piedras, por la textura del suelo y especialmente por el contenido de arcilla. La resistividad eléctrica del suelo también está relacionada con la estructura del suelo y la compactación del suelo (Buvat et al., 2014).

### Figura 6

*Distribución del flujo de corriente en suelo homogéneo*



*Nota.* Tomado de “Electrical resistivity survey in soil science: A review”, por A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, y G. Richard, 2005. *Soil and Tillage Research* 83(2), p. 176, <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>. All rights reserved. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirec.

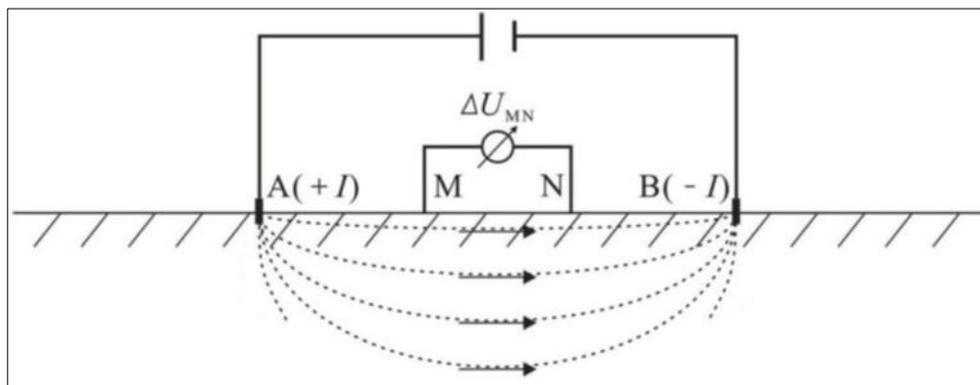
#### 1.1.8 Método de resistencia eléctrica (ERM)

El uso de ERM se refiere a la medición de la resistividad aparente del suelo como una función de las propiedades físicas del suelo. La resistividad eléctrica del suelo puede controlarse utilizando diversas configuraciones de electrodos, incluidos los métodos de uno, dos y cuatro electrodos. Durante los estudios de resistividad, se inyecta corriente eléctrica en el suelo a través de un par de electrodos de corriente, y la diferencia de potencial eléctrico se mide entre un par de electrodos de potencial (An et al., 2020). Las mediciones de la resistividad del

suelo se utilizan habitualmente con un método de sondeo de cuatro puntos, como el método de Wenner. El principio básico del sistema de medición de la resistividad del suelo,  $\rho$ , es que cuando se aplica una tensión constante se aplica a través de dos sondas colocadas en el suelo, la corriente que fluye entre las sondas es inversamente proporcional a la resistencia del suelo, la corriente  $I$  pasa a través de dos sondas conductoras en la superficie del suelo (Islam y Chik, 2013). Las matrices tradicionales de electrodos en el método de cuatro electrodos incluyen la matriz dipolo-dipolo, matriz polo-polo, matriz Schlumberger y matriz Wenner. Por lo general, la Wenner en el método de los cuatro electrodos es la más utilizada para medición de la resistividad del suelo sobre el terreno (An et al., 2020).

### Figura 7

#### *Toma de tierra vertical*



*Nota.* Tomado de “An experimental application of electrical resistivity/resistance method (ERM) to characterize the evaporation process of sandy soil”, por, N. An, C. Tang, Q. Cheng, D. Wang y B. Shi, 2020. *Physics and Chemistry of the Earth* 83(2), p. 2, <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>. Copyright 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

En la medición, la corriente  $I$  (A) generada artificialmente se inyecta en el suelo a través de dos electrodos (A y B), y la diferencia de potencial resultante  $\Delta U$  (V) entre dos puntos M y N se controla a través de otros dos electrodos situados en estos puntos. Donde  $I$  es la corriente inyectada (A);  $\Delta U_{MN}$  es el potencial eléctrico medido (V) entre M y N;  $MA$ ,  $MB$ ,  $NA$  y  $NB$  representan las distancias relativas (m) entre los electrodos M y A, M y B, N y A, N y NB. distancias relativas (m) entre los electrodos M y A, M y B, N y A y N y B, respectivamente; el coeficiente geométrico  $K$  (m) representa cómo fluye la corriente dentro del material y el efecto del electrodo (An et al., 2020).

### 1.1.9 Resistividad aparente

Cuando el suelo es uniforme, la resistividad calculada es constante e independiente de la distancia entre electrodos y de la localización de la superficie. Cuando existen heterogeneidades en el subsuelo, la resistividad varía en función de la posición relativa de los electrodos. La resistividad calculada se denomina resistividad "aparente". Esta última permite una estimación cualitativa de los parámetros eléctricos del medio, pero no proporciona la resistividad real y la forma de las anomalías. Cada operación corresponde a una medición volumétrica y constituye una información cualitativa que se traza frente a una pseudopropundidad. Así, los valores de resistividad aparente en una pseudosección distorsionan la imagen real del modelo del subsuelo y dependen estrechamente del tipo de configuración de los electrodos. Para un estudio determinado, la distribución de la resistividad aparente resultante depende de la sensibilidad del electrodo (Samouëlian et al., 2005).

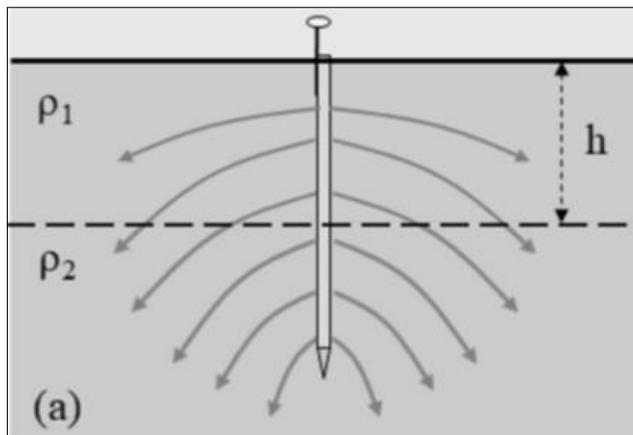
Para calcular el rendimiento de un sistema de puesta a tierra de tierra, es necesario obtener un modelo simplificado de la estructura real no uniforme del suelo y, para ello, es necesario mediciones de la resistividad de la tierra; para las aplicaciones de ingeniería, estas mediciones se realizan normalmente utilizando el método de Wenner, la información de las mediciones puede representarse en una curva de resistividad aparente, que es la base para los cálculos posteriores (Mombello et al., 1996).

### 1.1.10 Modelización del suelo

El modelado del suelo afecta directamente a la estimación de la resistencia del suelo, el aumento del potencial del suelo y las tensiones de contacto y de paso, así como a los límites de tensión permitidos correspondientes en caso de fallo del suelo; está demostrado que la resistividad eléctrica del suelo varía con la profundidad; por lo tanto, las condiciones reales del suelo pueden representarse mediante un modelo de suelo multicapa que comprenda varias capas caracterizadas por su resistividad y grosor; sin embargo, de acuerdo con la práctica común, los modelos de suelo uniformes o de dos capas se utilizan en el análisis del sistema de puesta a tierra (Datsios y Mikropoulos, 2017).

### Figura 8

*Densidad de corriente a través de la varilla en un suelo de dos capas*



*Nota.* Tomado de “A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models”, por, R. Batista, C.E.F. Caetano, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes y E.N. Cardoso, 2020. *Electric Power Systems Research* 180 (2020), p. 2, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106129>. Copyright 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

La resistencia de puesta a tierra, que refleja la capacidad de disipación de corriente de los electrodos, se utiliza como un índice importante para evaluar. En suelos de baja resistividad, el rendimiento de disipación de corriente incluso si el electrodo de puesta a tierra está muy corroído (Zhang et al., 2020).

#### 1.1.11 El sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra se encarga de absorber la peligrosa energía del rayo y limitar las sobretensiones. El otro objetivo del estudio del diseño de la puesta a tierra es alcanzar las condiciones de seguridad evaluando las bajas tensiones de contacto y de paso con respecto a los niveles permitidos admisibles (Sabiha et al., 2021).

La calidad de un sistema de puesta a tierra es crucial para cualquier sistema de energía eléctrica, ya que (Camara et al., 2020):

- Proporciona la vía de impedimento más baja y rápida para que las corrientes de fallo se disipen en la tierra,
- Evita el riesgo de alta tensión en el sistema de energía y

- Garantiza tanto la protección como la seguridad de las personas y los equipos manteniendo la referencia de potencial.

Generalmente, un sistema de puesta a tierra adecuado requiere un valor de impedancia bajo. Un buen rendimiento del sistema de puesta a tierra se debe realizar desde la fase de diseño, durante la construcción e incluso después, mediante mediciones periódicas (Lima et al., 2019).

Los criterios de seguridad descritos en las normas IEEE 80 definen los límites de los gradientes de potencial en cualquier emplazamiento. Si el potencial supera los límites definidos en la norma, pueden producirse descargas eléctricas perjudiciales. Las descargas peligrosas son el paso, el contacto y los potenciales de dispersión o transferencia (Camara et al., 2020).

Las redes de tierra desempeñan un papel importante en los sistemas de protección contra el rayo. En caso de que caiga un rayo, las redes de puesta a tierra pueden descargar rápidamente la corriente del rayo a tierra, reduciendo así las pérdidas causadas por los rayos. Sin embargo, durante el proceso de descarga corrientes de rayo por los sistemas de puesta a tierra, las subidas de potencial de las de puesta a tierra pueden suponer una amenaza para las personas que se encuentran alrededor de los sistemas de puesta a tierra, así como para los equipos conectados a dichos sistemas (Z. Guo et al., 2021).

Los sistemas de puesta a tierra desempeñan un papel fundamental para la protección y estabilidad de los sistemas de energía eléctrica, que están sometidos a diversos fenómenos transitorios, como rayos o fallos con corrientes de gran amplitud, y los sistemas de puesta a tierra deben disipar adecuadamente el exceso de corriente en el suelo (Araújo et al., 2021).

#### **1.1.12 Electrodo a tierra**

Los electrodos de puesta a tierra desempeñan un papel fundamental en los sistemas eléctricos, que deben disipar altas corrientes en el suelo y minimizar las tensiones de paso y contacto para proteger a los seres humanos cerca de las instalaciones eléctricas. Debido a las avanzadas técnicas de perforación, se han empleado largas barras conductoras como arreglos de puesta a tierra para los sistemas de puesta a tierra combinadas con las tradicionales para obtener baja

impedancia en el sistema de puesta a tierra sometida a impactos de rayos. Sin embargo, deben tenerse en cuenta muchos factores para calcular con precisión la impedancia del sistema de puesta a tierra, como la dependencia de la frecuencia de los parámetros eléctricos del suelo, la estratificación del terreno, el contenido de agua y el efecto de ionización (Araújo et al., 2023).

Los electrodos de puesta a tierra proporcionan protección a las personas en los alrededores de la estructura afectada y evitan daños a las instalaciones y equipos durante transitorios o condiciones operativas defectuosas. Se requiere un sistema de puesta a tierra que tenga una baja impedancia para mitigar las sobretensiones causadas por los rayos en las líneas de transmisión. Además, es necesario disipar la corriente de falla de manera de minimizar los voltajes de paso y de contacto alrededor de la estructura afectada (Araújo et al., 2021).

La varilla de tierra vertical es la forma más común de electrodo porque puede clavarse profundamente bajo el suelo para aprovechar el suelo de baja resistividad. Las varillas de tierra se fabrican en distintas longitudes, diámetros y materiales que cumplen las normas pertinentes (Joffe y Lock, 2023).

#### **1.1.13 Técnicas de puesta a tierra**

En los suelos de baja resistividad, se inserta una simple varilla de acero revestida de cobre (Cu) o de cobre de longitud  $L(m)$  y radio  $r(m)$  adecuados. Cuando el suelo circundante tiene una resistividad muy alta, deben utilizarse múltiples varillas paralelas, de modo que la distancia entre las dos varillas de puesta a tierra vecinas debe ser al menos el doble de la profundidad de la varilla con el fin de obtener el máximo beneficio del uso de múltiples varillas. Sin embargo, cuando la resistividad del suelo es demasiado alta o el espacio es insuficiente para construir la red de puesta a tierra con el número necesario de varillas de puesta a tierra paralelas, se puede utilizar compuestos mejoradores para reducir la alta resistencia de puesta a tierra (Khan et al., 2012).

#### **1.1.14 Compuestos mejoradores**

En la aplicación de puesta a tierra eléctrica, el propósito principal del material de puesta a tierra es transmitir la descarga eléctrica instantánea directamente y segura a tierra. Del mismo modo, el material proporciona un

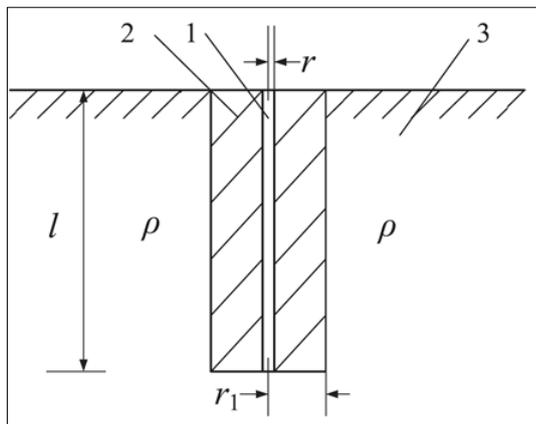


camino para el flujo de corriente desde el punto de fallo a tierra a través de una serie de electrodos conductores, como cobre y el aluminio; por otro lado, la bentonita y la marconita se suelen utilizar como materiales de relleno o como refuerzo del terreno en aplicaciones de puesta a tierra. La bentonita sigue considerándose uno de los sistemas de puesta a tierra más eficaces y fiables en comparación con otros con otros materiales de puesta a tierra alternativos (Azmi et al., 2021).

El concreto eléctricamente conductor es una categoría de concreto que contiene componentes conductores de la electricidad para conseguir conductividad eléctrica estable y elevada, tiene características tanto de material estructural como de material conductor, lo que atrae cada vez más la atención de investigadores e ingenieros debido a sus aplicaciones latentes en la actualidad, concreto eléctricamente conductor se diseñó para actuar como escudo electromagnético; además, el concreto eléctricamente conductor se usa para mejorar las características electromagnéticas de la red de tierra y reducir eficazmente los daños en los equipos y daños corporales causados por las sobretensiones en la actualidad (Zhang et al., 2017).

### Figura 9

*Electrodo de puesta a tierra de varilla de hormigón conductor de la electricidad*



*Nota.* En la figura 9 se tiene: (1 electrodo de cobre, 2 concreto eléctricamente conductor, 3 suelo). Tomado de “Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers: Computational model and case study”, por, J. Zhang, L. Xu y Q. Zhao, 2017. *Construction and Building Materials*, 145 (2017) 347–353, p. 349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.223>. Copyright 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

La bentonita es una arcilla natural compuesta principalmente por el mineral montmorillonita, es higroscópica y puede absorber directamente la humedad del entorno; las bentonitas, al tener excelentes capacidades de retención de agua e hinchamiento, pueden conducir el fallo eléctrico de los rayos rápidamente hacia el suelo, evitando al mismo tiempo daños en las estructuras debidos a los rayos; sin embargo, la bentonita puede no funcionar bien en ambientes secos, en esta circunstancia, la resistividad eléctrica es muy alta y puede que no conduzca la corriente eléctrica de forma eficaz provocando el fallo del sistema de puesta a tierra (Azmi et al., 2021).

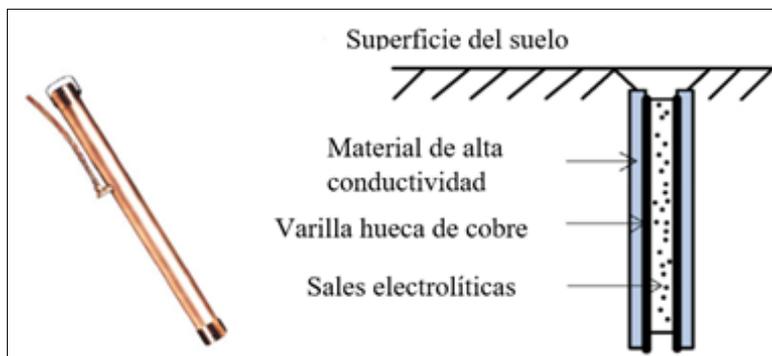
#### 1.1.15 Varilla accionada químicamente

La varilla accionada químicamente utilizada en las pruebas es una varilla de cobre hueca con sales electrolíticas en su interior. Además, según la descripción del producto, las sales electrolíticas pueden absorber la humedad del suelo alrededor de la varilla, las sales electrolíticas permean en el suelo a través del orificio de la barra, las sales electrolíticas que salen de la barra mejoran el componente del suelo y disminuyen la resistividad; entonces, cuando se entierra la barra, los materiales de relleno de alta conductividad se acolchan fuera de la

barra, lo que puede ayudar a absorber la humedad, disminuir la resistividad del suelo y proteger la varilla de la oxidación (Wu et al., 2014).

### Figura 10

#### *Varilla de accionamiento químico*



*Nota.* Tomado de “Optimal design of tower footing device with combined vertical and horizontal grounding electrodes under lightning”, por, J. Wu, B. Zhang, J. He, R. Zeng, 2014. *Electric Power Systems Research*, 145 (2014), p. 3980, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.021>. Copyright 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

#### 1.1.16 Varilla accionada no metálica

La varilla no metálica utilizada en las pruebas es un bloque de carbón con sales electrolíticas dopadas en su interior y una barra de acero que lo atraviesa, se ha observado que el coque aumenta la superficie de contacto y reduce la resistencia de contacto entre la barra de acero y el suelo, y que las sales electrolíticas pueden desempeñar el mismo papel que en el interior de la barra accionada químicamente (Wu et al., 2014).

## Figura 11

### *Varilla de accionamiento no metálica*



*Nota.* Tomado de “Optimal design of tower footing device with combined vertical and horizontal grounding electrodes under lightning”, por, J. Wu, B. Zhang, J. He, R. Zeng, 2014. *Electric Power Systems Research*, 145 (2014), p. 3980, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.021>. Copyright 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

### **1.1.17 Representación del sistema de puesta a tierra**

El sistema de puesta a tierra es uno de los principales recursos responsables de disipar la corriente procedente de un rayo a tierra, siendo un componente importante para la seguridad de la población, aunque se sabe que el desempeño puede ser mejorado considerando el uso de mallas de puesta a tierra as, la implementación de estructuras simples compuestas de electrodos horizontales o verticales es una práctica común adoptada por las compañías eléctricas tanto en redes de distribución como de transmisión; por lo general, la aplicación práctica de estos componentes básicos de puesta a tierra se justifica ya sea por las limitaciones físicas, especialmente en las zonas urbanas, o por medio de los recursos financieros, teniendo en cuenta sólo el material mínimo necesario para obtener valores bajos de la impedancia de puesta a tierra (Gazzana et al., 2014).

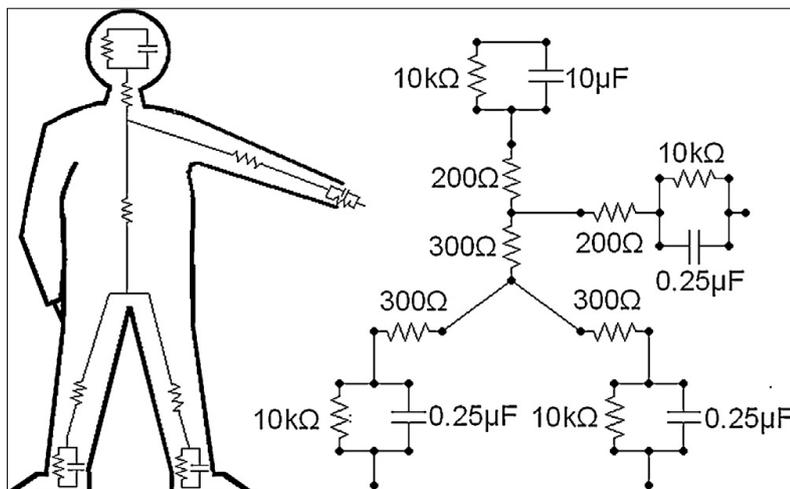
### **1.1.18 Representación del cuerpo humano**

La resistencia del cuerpo humano depende de la humedad, la temperatura y otras propiedades físicas, además, se considera que el cuerpo humano tiene dos impedancias (externa e interna); la impedancia del interior del cuerpo es menor que la de la piel, esta cantidad puede representarse mediante una combinación de

componentes resistivos y capacitivos. La impedancia del cuerpo depende de la tensión, la frecuencia y el área de contacto, teniendo en cuenta el paso de la corriente a través de él. En la bibliografía se pueden encontrar modelos más simplificados en los que el cuerpo se representa mediante impedancias equivalentes. En resumen, el cuerpo humano se modela mediante una única resistencia que oscila entre 500 Ohm y 10 000 Ohm (Gazzana et al., 2014).

**Figura 12**

*Representación del cuerpo humano*



*Nota.* Tomado de “A study of human safety against lightning considering the grounding system and the evaluation of the associated parameters”, por, D. Gazzana, A. Bretas, G. Dias, M.Telló, D. Thomasc y C. Christopoulos, 2014. *Electric Power Systems Research*, 113 (2014), p. 90, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.015>. Copyright 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1.1.19 Umbral de supervivencia

Para evaluar la influencia de los parámetros del suelo y del rayo en las magnitudes eléctricas a las que puede estar expuesta una persona, se utilizan tensiones de paso y de contacto como entrada al modelo del cuerpo humano, se puede estimar la corriente que atraviesa el corazón, la energía específica de la fibrilación ventricular puede utilizarse como parámetro de referencia en los estudios de soportabilidad (Gazzana et al., 2014).

### 1.1.20 Estiércol de camélidos sudamericanos

Los camélidos sudamericanos domésticos tienen una larga historia como animales de granja en la región andina las llamas y las alpacas están bien adaptadas a la producción extensiva a gran altitud (Miranda-de la Lama y Villarroel, 2023). Suelen vivir por encima de los 3.800 m de altitud, en las duras condiciones de la cordillera de los Andes estaciones húmedas y secas extremas, bajos niveles de oxígeno, suministro de agua poco frecuente y forraje de mala calidad rara vez reciben suplementos alimenticios y su dieta se compone principalmente de pastos (27-53 %), juncos o carrizos (32-58 %) y hierbas (15-33 %) (Bonavia y McGregor, 2021). Los camélidos tienen importancia económica y social para millones de personas en todo el mundo como fuente de proteínas fibra y transporte, y de estiércol (Womble et al., 2021). El estiércol de alpaca tiene las siguientes características químicas: pH 7.96, Nitrógeno (N) 1.98%, óxido de fósforo ( $P_2O_3$ ) 1.09 %, óxido potasio ( $K_2O$ ) 2.07%, óxido de calcio (CaO) 5.29 %, óxido de magnesio (MgO); de acuerdo, al análisis realizado en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Hinostroza, 1999).

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Internacionales

Camara et al. (2020) propone un nuevo estudio para investigar el rendimiento de la seguridad del sistema de puesta a tierra; la metodología se demuestra meticulosamente mediante amplios experimentos de campo con materiales naturales y químicos de mejora de la puesta a tierra, donde se realiza una comparación de rendimiento entre los materiales de mejora naturales y químicos bajo diferentes niveles de humedad y de tensión. Gazzana et al. (2018) presenta una investigación experimental del comportamiento del sistema de puesta a tierra de las turbinas eólicas altas en los dominios de tiempo y frecuencia; se consideraron dos escenarios: en el primero, las medidas fueron realizadas en el sistema de puesta a tierra embebido en la fundación del aerogenerador, antes del montaje del mismo; en el segundo, se incluyó el aerogenerador completo (torre, góndola y palas). Kontargyri et al. (2015) realiza un análisis completo paso a paso para el diseño de un sistema de puesta a tierra de un parque eólico; la estructura del suelo se determina en base a las mediciones de resistividad del suelo, el uso

del método apropiado y la aplicación rigurosa del mismo son muy importantes, posteriormente, diseña un sistema de puesta a tierra para cada aerogenerador y la estación de control y se proponen mejoras del sistema de puesta a tierra en los casos de valores incrementados de resistencia del suelo y tensiones de tacto y paso inseguras. Mohamad Nor et al. (2013) presenta un conjunto de pruebas experimentales y resultados de ensayos sobre el comportamiento de los sistemas prácticos de puesta a tierra bajo altas corrientes de impulso, donde los sistemas de puesta a tierra consisten en 3 conexiones de sistemas de puesta a tierra, 2, 3 y 4 electrodos. Guo et al. (2010) presenta los resultados de las pruebas experimentales en una red de tierra de 5mx5m, sumergida en agua y energizada, en corriente alterna, corriente continua e impulso, los valores de tierra medida se comparan las distribuciones de impedancia y de potencial de la superficie del agua con las obtenidas de los cálculos analíticos y las simulaciones numéricas detalladas por ordenador. Faleiro et al. (2022) estudia el efecto de una capa de óxido o de cualquier capa de material conductor que rodee la superficie del electrodo sobre el rendimiento del sistema de puesta a tierra. Sabiha et al. (2021) evalúa la sostenibilidad del servicio de un aerogenerador mediante la evaluación de las redes de puesta a tierra en condiciones estacionarias y transitorias basadas en caída de rayos, diseña una red de puesta a tierra eficaz de acuerdo con la norma IEC 61400-24, donde la alta resistividad del suelo es un reto durante el diseño; para llevar a cabo el estudio, se miden las resistividades aparentes utilizando el método Wenner, sobre el terreno y realiza un marco de modelización multicapa del suelo utilizando el método de Sunde. Guizán et al. (2022) presenta una formulación matemática y numérica para diseñar y analizar sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas subterráneas; obtiene una aproximación realista de la estructura del suelo, esta formulación permite obtener los principales parámetros de estos sistemas de protección (la resistencia de red, la elevación del potencial de tierra y la tensión de paso y de malla). Cai et al. (2021) analizan dos modos de aplicación típicos de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones con esquemas de trazado plano y longitudinal; en primer lugar, se presentan el índice de seguridad y la tensión soportada por los equipos secundarios en las subestaciones multipunto y en segundo lugar, se de las redes de puesta a tierra. Ghomi et al. (2022) presenta una investigación exhaustiva de los efectos de la estructura del suelo de puesta a tierra de la subestación sobre los transitorios de

conmutación/rayo; la ventaja significativa de esta técnica es su capacidad para tratar eficazmente con los sistemas de puesta a tierra de subestaciones a alta frecuencia, esta evaluación se realiza considerando dos estructuras de suelo: (1) un suelo uniforme y (2) un suelo con una estructura en capas. Zhiwei y Zhao (2012) ha desarrollado un método de cálculo numérico de las redes de puesta a tierra de acero; los resultados muestran que la impedancia de puesta a tierra disminuye al aumentar la corriente de cortocircuito; así, la impedancia de puesta a tierra con una gran corriente de fallo es inferior a la impedancia de puesta a tierra medida. Li et al. (2021) proponen un método de protección de puesta a tierra basado en el corriente basado en el coeficiente de relación de corriente homopolar; los resultados de la simulación PSCAD revelan que el método propuesto muestra una alta fiabilidad y sensibilidad cuando se produce una falla a tierra de alta resistencia. Araújo et al. (2023) propone un enfoque matricial para calcular la impedancia de puesta a tierra armónica de las barras enterradas en suelos estratificados dependientes de la frecuencia; en este enfoque, cada segmento de varilla se modela como una línea de transmisión corta en la que se calcula la impedancia de puesta a tierra armónica equivalente. Camara et al. (2020) realizó una comparación de rendimiento entre los materiales de mejora naturales y químicos bajo diferentes niveles de humedad y tensiones de tensión, aplicaron varios voltajes ajustables en el rango entre 0,85 y 3,76 kV a tres varillas de cobre colocadas verticalmente en diferentes materiales de puesta a tierra; los experimentos, demuestran que los materiales ofrecen una baja resistividad del suelo alrededor de los electrodos, son una solución rentable para los suelos de alta resistividad y resultan eficaces en términos de costes y cumplen las normas de seguridad IEEE 80. Lima et al. (2019) presenta un método para medir las resistencias de puesta a tierra, que se basa en el uso de corriente de impulso rápido y cables cortos en los circuitos auxiliares de medición, las mediciones se realizan utilizando cable corto en el circuito de potencial y cable o LIA (acrónimo portugués de Línea Artificial Infinita), en el circuito de corriente. Ghania (2019) introduce un modelo propuesto basado en una celda unitaria de puesta a tierra desarrollada utilizando los condensadores de dos capas (TLC). La celda propuesta se implementa como una celda unitaria para simular el comportamiento del sistema de puesta a tierra bajo impactos de rayos considerando los efectos de ionización del suelo. Alipio et al. (2019) demuestra que la dependencia de la

frecuencia de los parámetros del suelo es responsable de disminuir el aumento del potencial de tierra y, por tanto, la impedancia de impulso y el coeficiente de impulso de los sistemas de puesta a tierra. Este efecto es más pronunciado para suelos de alta resistividad e impulsos de corriente rápidos. Zhang et al. (2020) estudia el método de cálculo de la resistencia de puesta a tierra del electrodo corroído, propone la resistencia de puesta a tierra relativa como criterio de diagnóstico de la corrosión y se dividen los grados de corrosión en función de dicho criterio, también analiza el error del método de diagnóstico y se estudia el sistema de medición y diagnóstico mediante experimentos de campo. Batista et al. (2020) presenta un estudio de una disposición de puesta a tierra propuesta para torres de líneas de transmisión, en particular para condiciones de un suelo estratificado donde la resistividad eléctrica de la primera capa es mayor que la del segundo medio; los resultados muestran que la resistencia de puesta a tierra, importante para los fenómenos de baja frecuencia, y la impedancia de impulso a los transitorios rápidos, disminuyen significativamente con el uso de electrodos verticales. Šesnić et al. (2021) analiza la sensibilidad de la impedancia transitoria del electrodo horizontal de puesta a tierra, aplica el método de colocación estocástica teniendo en cuenta una amplia lista de parámetros aleatorios (longitud y profundidad de los electrodos, resistividad y permitividad del suelo, parámetros del impulso del rayo) que influyen en la eficacia del electrodo de puesta a tierra. Batista y Paulino (2021) muestran un procedimiento para calcular la resistencia y la impedancia armónica de electrodos horizontales de puesta a tierra enterrados en un suelo estratificado verticalmente.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Los sistemas de puesta a tierra son elementos importantes de toda instalación eléctrica, ya que protegen contra las sobretensiones generadas por muy diversas causas (Faleiro et al., 2022). Un aspecto crítico en las instalaciones eléctricas, es la seguridad, especialmente en situaciones de fallo para evitar descargas eléctricas; los sistemas de puesta a tierra son los dispositivos encargados de garantizar las condiciones de seguridad y el funcionamiento de estas instalaciones. Por lo tanto, su diseño y análisis son esenciales (Guizán et al., 2022). La resistencia depende en gran medida de la dimensión de la varilla y de la resistividad del suelo (Sekioka et al., 2005). La resistencia de puesta a tierra está estrechamente relacionada con la resistividad del suelo (Zhiwei y Zhao, 2012). El tipo de suelo juega un papel importante en la determinación del valor de resistencia de la conexión a tierra, debido a su alta resistividad posible del suelo, o su particularmente ambiente corrosivo (Androvitsaneas et al., 2015). Los sistemas de puesta a tierra se comportan de manera diferente cuando la resistencia de la tierra no es lineal, debido a procesos térmicos y de ionización. (Mohamad et al., 2013). La ionización del suelo como el aumento en el tamaño del conductor de tierra, tiene una influencia beneficiosa, especialmente en suelos de alta resistividad (Liu et al., 2004). Por otra parte, la humedad tiene influencia en la resistencia del suelo depende no sólo de las características de la capa superior, sino también de la resistividad de las capas más profundas, y en la resistividad aparente depende tanto del tamaño del sistema de puesta a tierra como de las características del suelo (Luiz et al., 2015). El sistema de puesta a tierra debe tener una impedancia y una capacidad de transporte de corriente suficientemente bajas para evitar la acumulación de tensiones que puedan dar lugar a un indebido peligro para los equipos conectados y para las personas (W. Hu et al., 2012). Debe ser diseñado con "cero impedancias" para proporcionar una descarga efectiva de las corrientes de falla y para evitar el aumento potencial en y alrededor de la instalación (Mohamad Nor et al., 2013). Para lograr una protección adecuada, es esencial implementar procedimientos técnicos para asegurar no sólo que los valores de resistencia del suelo medidos durante la implementación del sistema de puesta a tierra estén dentro de los límites establecidos por las normas, sino también que se mantengan dentro de estos límites (Luiz et al., 2015). Se

aplican algunos métodos en la práctica ingeniería para reducir la resistencia de la puesta a tierra. Entre ellas el relleno conductivo alrededor de los dispositivos de puesta a tierra es ampliamente utilizado (W. Hu et al., 2012). El uso de compuestos mejoradores de tierra puede disminuir la resistencia de tierra y la impedancia de los sistemas a niveles muy bajos, de modo que las corrientes altas puedan dispersarse en la tierra de forma segura (Androvitsaneas et al., 2015). Por lo tanto, es necesario estudiar el efecto del recubrimiento del electrodo en el rendimiento del sistema de puesta a tierra (Faleiro et al., 2022).

Las descargas eléctricas producidas por los rayos causan anualmente pérdidas de vidas humanas, de animales y daños a las instalaciones; esto es, debido a que no se cuentan con sistemas de protección capaces de disipar la corriente producida por este fenómeno que ocurre en las zonas altoandinas de nuestra región.

En relación con esto, el objetivo del presente estudio es analizar el comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos en los pozos a tierra; por ello, se formula la siguiente interrogante:

¿Como mejora el tratamiento de los pozos de puesta a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos?

### **2.1.1 Descripción de la realidad problemática**

Desde los albores de la humanidad, se han observado miles de lesiones provocadas por rayos, que han causado muertes y daños a los seres humanos con efectos a corto y largo plazo. Se sabe que los efectos de una determinada corriente eléctrica que atraviesa el cuerpo humano están relacionados principalmente con su duración, frecuencia y magnitud (Gazzana et al., 2014). El sistema de puesta a tierra se encarga de absorber la peligrosa energía del rayo y limitar las sobretensiones correspondientes (Sabiha et al., 2021). Un sistema de puesta a tierra de baja resistencia se caracteriza por su capacidad superior para cortar rápidamente la corriente de defecto y limitar así la sobretensión de resonancia y reducir el nivel de aislamiento (Li et al., 2021). En consecuencia, se requiere un sistema de puesta a tierra para disipar la energía del rayo en la tierra. El otro objetivo del estudio del diseño de la puesta a tierra es alcanzar las condiciones de

seguridad evaluando las bajas tensiones de contacto y de paso con respecto a los niveles permitidos (Sabiha et al., 2021).

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado es un factor operativo notablemente eficaz en el campo de la protección, la seguridad humana, la coordinación del aislamiento y la compatibilidad electromagnética. El sistema de puesta a tierra de las subestaciones se compone de electrodos verticales y horizontales insertados en un suelo uniforme o estratificado para conseguir una impedancia de puesta a tierra adecuada (Ghomi et al., 2022).

## 2.2 Enunciados del problema

De acuerdo a lo descrito se plantea lo siguiente:

### 2.2.1 Problema general

- ¿Como mejora el tratamiento de los pozos de puesta a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos?

### 2.2.2 Problemas específicos

- ¿Como influye la resistividad del terreno en la resistencia del pozo a tierra?
- ¿Cómo mejora la resistencia del pozo a tierra, con el estiércol de camélidos sudamericanos domésticos?

## 2.3 Justificación

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta el mundo hoy en día es el del cambio climático global y sus efectos en el medio ambiente (Snodgrass y Xie, 2020). Además, los cambios climáticos actuales han aumentado la intensidad y frecuencia de las tormentas, lo que hace aún más importante la investigación sobre la protección de los sistemas eléctricos, especialmente en lo que se refiere a la protección contra la incidencia del rayo (M. A. Araújo et al., 2015). Las catástrofes provocadas por rayos son la tercera catástrofe meteorológica más frecuente (después de las tormentas de lluvia/inundaciones y las catástrofes meteorológicas y geológicas). Con el desarrollo de las economías de los países, las pérdidas económicas y las víctimas causadas por los desastres provocados por rayos son cada vez más graves (Montanyà et al., 2022) .

El rayo es un fenómeno natural que no puede ser controlado por el hombre. La máxima eficacia de la protección contra el rayo depende de la existencia de red de puesta

a tierra con buenos conductores conectados directamente con el suelo de la tierra, que funciona para construir un aislamiento fiable que protege la instalación de los efectos de los rayos (Taha et al., 2020). Entre los muchos factores que influyen en el efecto de la protección, el dispositivo de puesta a tierra desempeña un papel muy importante, ya que debe tener una impedancia y una capacidad de transporte de corriente suficientemente bajas para evitar la acumulación de tensiones que puedan resultar peligrosas para los equipos conectados y para las personas (Wu et al., 2016). Estos aspectos hacen que el diseño de un sistema de protección contra rayos adecuado, que incluya el sistema de puesta a tierra, sea de gran importancia (Alipio et al., 2021).

El sistema de puesta a tierra desempeña un papel importante en los estudios de protección y fiabilidad desde los primeros días de la instalación de sistemas eléctricos. El sistema de puesta a tierra debe proporcionar una segura y eficaz protección de las sobretensiones a tierra. Los sistemas de puesta a tierra deben garantizar una baja impedancia y una alta capacidad de transporte de corriente para evitar la elevación del potencial de puesta a tierra que pueda dar lugar a riesgos laborales para los equipos conectados así como para cualquier persona (Ghania, 2019).

Disminuir la impedancia de puesta a tierra es una opción adecuada para aumentar el rendimiento de una instalación contra rayos. Para regiones con alta actividad de rayos y suelos de alta resistividad, asegurar que una instalación tenga un rendimiento adecuado y una tasa de desconexión esperada por debajo de los valores límite estándar puede ser un verdadero reto (R. Batista et al., 2020).

Para reducir la resistencia de puesta a tierra se han propuesto diferentes materiales. Entre ellos se incluyen el uso de bentonita, lodo de perforación, escoria de horno de acero, acumulación de agua subterránea utilizando pozos profundos y una variedad de otros materiales y técnicas (Khan et al., 2012). A principios de la década de 1940, la reducción artificial de la resistividad del suelo ampliamente en la comunidad científica debido a las frecuentes descargas eléctricas y la preocupación por la seguridad del personal. Como resultado de estas investigaciones, la utilización de cloruro de sodio (NaCl) como material de mejora del suelo fue ampliamente difundido y practicado por la mayoría de las industrias (Camara et al., 2020).

Por lo tanto, el estudio planteado se justifica por lo siguiente:

En cuanto a la seguridad; se tiene que, en las zonas altoandinas del altiplano peruano, en épocas de presencia de lluvias también se presentan tormentas eléctricas de gran intensidad que traen consigo las descargas eléctricas conocidas como rayos, este fenómeno atmosférico ocasiona pérdidas de vidas humanas, animales y daños a los equipos; lo que, representa un beneficio a la sociedad en cuanto a los sistemas de seguridad.

En cuanto al cuidado del medio ambiente; vemos que, existen métodos de tratamiento químicos de los pozos a tierra para poder garantizar estos valores mínimos, estos tratamientos químicos tiene como consecuencia o daño colateral, la contaminación del suelo por la misma composición química del compuesto mejorador; como sabemos, el estiércol de los camélidos sudamericanos son residuos orgánicos amigables con el medio ambiente y la utilización de este residuo sería beneficioso para el medio ambiente en comparación con compuestos químicos.

En el aspecto económico; sabemos que, este residuo orgánico lo se tiene disponible en las zonas altoandinas especialmente en nuestra región; por lo que, representa también un beneficio económico en el proceso del tratamiento del pozo a tierra.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo General**

- Analizar el comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el tratamiento de los pozos de puesta a tierra.

### **2.4.2 Objetivos Específicos**

- Establecer la resistividad eléctrica del terreno para el cálculo de la resistencia del pozo a tierra.
- Determinar la resistencia del pozo a tierra tratado con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos.

## **2.5 Hipótesis**

### **2.6.1 Hipótesis General**

- El estiércol de camélidos sudamericanos domésticos mejora el tratamiento de los pozos de puesta a tierra.



### 2.6.2 Hipótesis Específicas

- La resistividad del terreno influye en la resistencia del pozo a tierra.
- La resistencia del pozo a tierra, mejora con el estiércol de camélidos sudamericanos domésticos.

## CAPÍTULO III

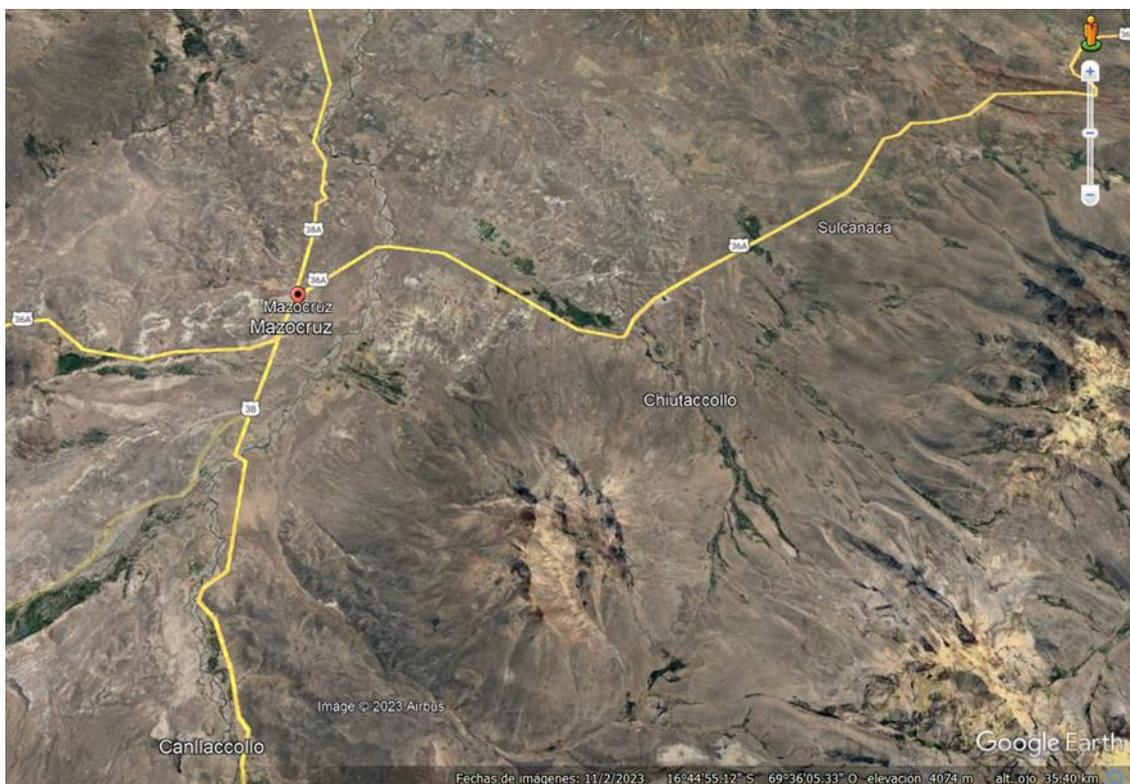
### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

La zona del estudio está ubicada en la parcialidad de Sullcanaca, distrito de Santa Rosa de Mazo Cruz, Provincia del Collao Ilave, departamento de Puno. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 16°44'53" S; 69°36'05" O, a una altitud de 4070 m.s.n.m. Como se aprecia en la imagen.

#### Figura 13

##### *Sullcanaca*



*Nota.* Ubicación de Sullcanaca Masocruz, Adaptado de “Google Earth Pro”, por, Google Earth, 2023, <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Copyright 2023 Google. All rights reserved.

#### 3.2 Población

En la presente investigación, el tamaño de la población de estudio esta, conformadas por los pozos a tierra ubicados ubicada en la parcialidad de Sullcanaca, distrito de Santa Rosa de Mazo Cruz

### **3.3 Muestra**

Para la presente investigación, la muestra esta, conformada por el pozo a tierra sin tratamiento y el pozo a tierra tratado con estiércol de los camélidos sudamericanos, ubicados en la parcialidad de Sullcanaca.

### **3.4 Método de investigación**

#### **3.4.1 Tipo de investigación**

La investigación objeto de estudio es del tipo descriptiva, debido a que buscó especificar propiedades, características y rangos importantes del fenómeno analizado, en este caso, de las variables estudiadas: resistividad del terreno y resistencia del pozo a tierra.

El estudio correlacional, asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población, que tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular (Sampieri et al., 2010). En el presente estudio se relaciona la resistividad del terreno con la resistencia del pozo a tierra.

Es un enfoque cuantitativo, es un estudio secuencial y probatorio; es decir, cada etapa precede a la siguiente y no puede brincar o eludir pasos, el orden es riguroso, aunque, desde luego, se puede redefinir alguna fase; en ese sentido, parte de una idea, que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica (Sampieri et al., 2010).

Por lo expuesto la presente tesis está dentro la investigación cuantitativa, descriptiva, correlacional.

#### **3.4.2 El método propuesto**

El método para el cumplimiento de los objetivos propuestos es el siguiente que se describe a continuación.

### 3.5 Descripción detallada del método por objetivos específicos

Para el cumplimiento de los objetivos específicos que se establecieron en el presente proyecto de investigación denominado: “Análisis del comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el tratamiento de los pozos de puesta a tierra en zonas altoandinas”, se realizara de acuerdo a la siguiente metodología.

#### 3.5.1 Resistividad eléctrica del terreno

Para medir la resistividad aparente de tierra se utiliza el método de los cuatro puntos (Wenner), por lo tanto, se instalan cuatro picas (sondas auxiliares) en la tierra, todas a una profundidad  $b$  y espaciadas (en línea recta) a intervalos  $a$ . Se hace pasar una corriente ( $I$ ) de prueba entre las dos sondas exteriores, y el potencial (voltios) entre las dos sondas interiores con un potenciómetro o un voltímetro de alta impedancia, entonces, la relación  $V/I$  da la resistencia  $R$  en ohmios.

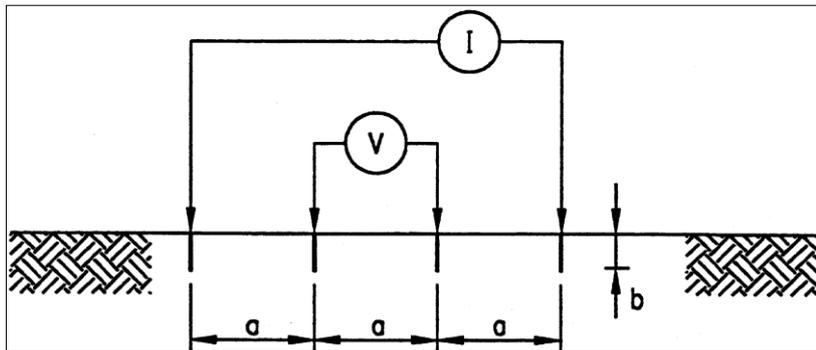
Disposición equidistante o de Wenner. Con esta disposición, las sondas están como se muestra en la figura 14. Sea  $a$  la distancia entre dos sondas adyacentes. Entonces la resistividad aparente  $\rho$  en términos de las unidades de longitud en las que se miden  $a$  y  $b$  es (IEEE-Std-81<sup>TM</sup>-2012, 2012):

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Teóricamente, los electrodos deberían ser contactos puntuales o electrodos semiesféricos de radio  $b$ . Sin embargo, en la práctica, se suelen colocar cuatro varillas en línea recta a intervalos  $a$ , conducidas a una Profundidad no superior en  $0,1 a$ . Entonces, el usuario puede suponer que  $b = 0$  y la ecuación pasa a ser

**Figura 14**

*Método Wenner de cuatro polos*



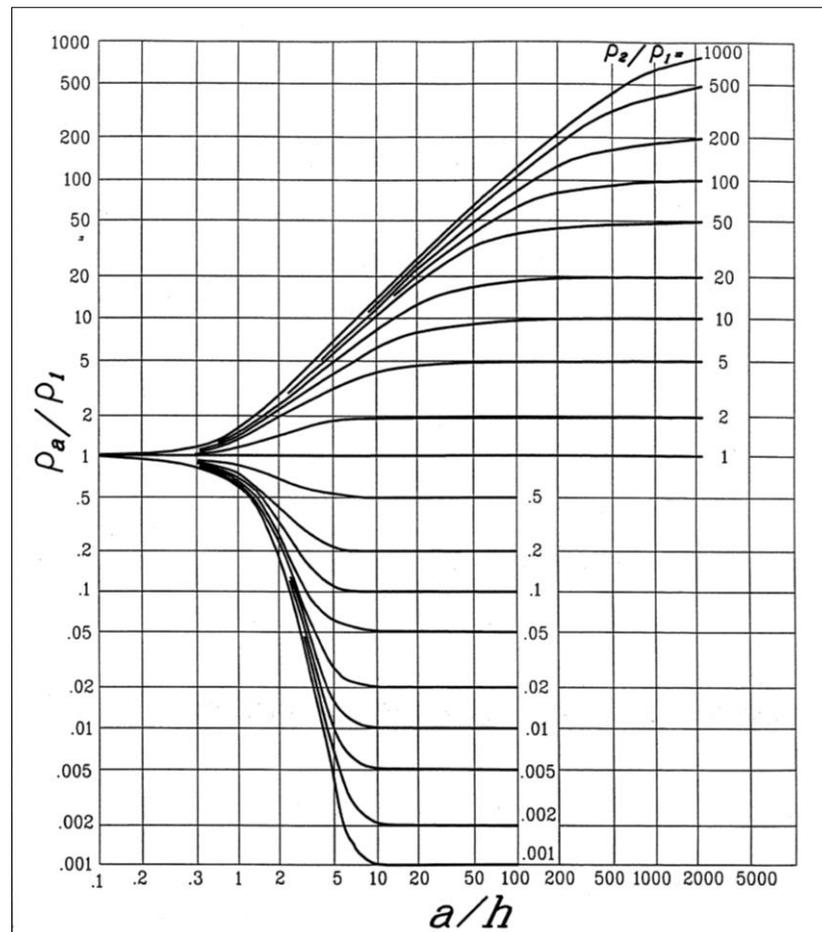
*Nota.* Tomado de “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” (vol. 56, p. 53) por IEEE Standard 80-2000, 2000, United States of America. *IEEE-SA Standards Board.* <https://www.ieee.org>. Copyright © 2000 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

**A. Modelo de suelo bicapa por método gráfico**

En el método de Sunde, el gráfico de la figura 15 se utiliza para aproximar un modelo de suelo de dos capas. Se basa en los datos de la prueba de Wenner de cuatro clavijas (IEEE-Std-80<sup>TM</sup>-2000, 2000).

**Figura 15**

*Grafica de Sunde*



*Nota.* Tomado de “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” (vol. 56, p. 53) por IEEE Power and Energy Society, 2015, United States of America. *IEEE-SA Standards Board.* <http://standards.ieee.org/>. Copyright © 2015 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

De acuerdo con la (IEEE Std 80<sup>TM</sup>-2013, 2015), los parámetros  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se obtienen por medio de la lectura de las mediciones de resistividad del terreno. Sólo  $h$  se obtiene por el método gráfico de Sunde, como sigue:

- Trazar el gráfico de la resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje de las ordenadas (y) en función a la distancia entre clavijas en el eje de las abscisas (x).
- Calcular  $\rho_1$  y  $\rho_2$  a partir del gráfico indicado en a).  $\rho_a$  correspondiente a un espaciado menor es  $\rho_1$  y para una separación mayor es  $\rho_2$ . Ampliar el gráfico de resistividad aparente en ambos

extremos para obtener estos valores extremos de resistividad. resistividad extremos si los datos de campo son insuficientes.

- Se calcula  $\rho_2/\rho_1$  y se elige una curva en el gráfico de Sunde de la figura 15, que se ajuste en el gráfico.
- Se selecciona el valor en el eje y de  $\rho_a/\rho_1$  dentro de la región inclinada de la curva  $\rho_2/\rho_1$ .
- Se toma el valor correspondiente de  $a/h$  en el eje x.
- Se calcula  $\rho_a$  multiplicando el valor seleccionado,  $\rho_a/\rho_1$ , en (d) por  $\rho_1$ .
- Se calcula la distancia entre sondas correspondiente en el gráfico de resistividad aparente trazado en a).
- Se determina h, la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda correspondiente, a.

#### **B. Cálculo teórico de la resistencia de puesta a tierra**

La relación matemática para evaluar la resistencia de un electrodo cilíndrico y vertical, considerando que  $L / r > 10$ , es: (Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, 2010).

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right)$$

En donde:

- R: Resistencia de tierra en Ohmios
- $\rho$ : Resistividad del suelo en Ohmios metro
- r : Radio del electrodo.
- L : Longitud de la varilla metros.

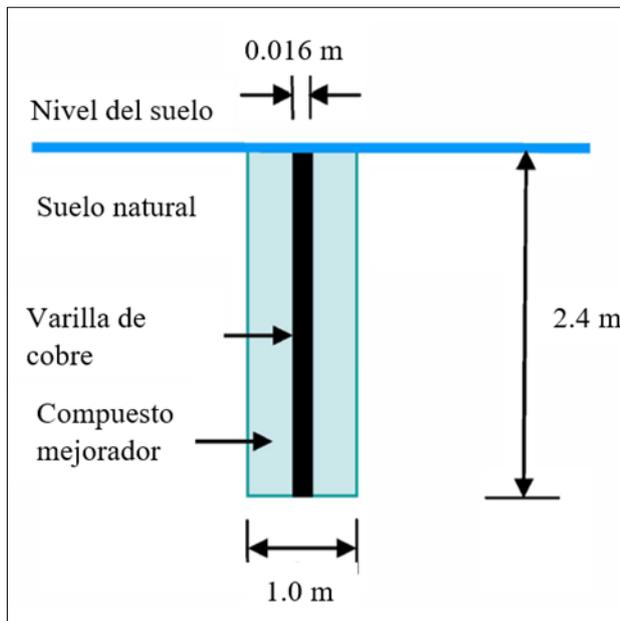
#### **3.5.2 Resistencia del pozo a tierra tratado**

Para realizar la medición del sistema de puesta a tierra se toma en cuenta el método de la caída de potencial establecido en la norma técnica.

El modelo del pozo a tierra se muestra en la figura

**Figura 16**

*Modelo del pozo a tierra*

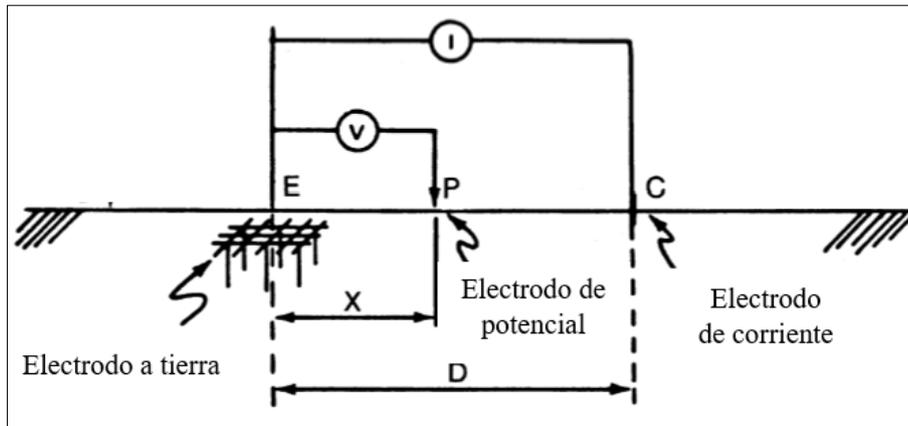


*Nota.* Adaptado de “Practical evaluation of ground enhancing compounds for high soil resistivities”, por, A. Galvan, G. Pretelln y E. Gaona, 2010. *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010*, pp. 1233-2.

Básicamente, la medición de la resistencia de tierra consiste en medir la resistencia del sistema de puesta a tierra con respecto a un electrodo de tierra remoto, el electrodo remoto se encuentra teóricamente a una distancia infinita del sistema de puesta a tierra, donde la densidad de la corriente de tierra se aproxima a cero (IEEE-Std-80<sup>TM</sup>-2000, 2000).

**Figura 17**

*Método de caída de potencial*



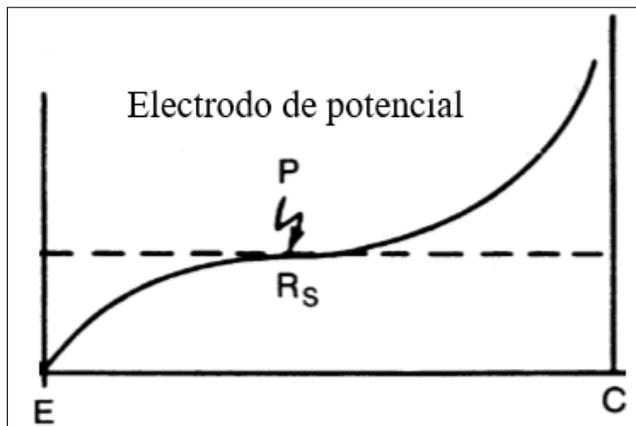
*Nota.* Adaptado de “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” (vol. 71, p. 117) por IEEE Power and Energy Society, 2015, United States of America. *IEEE-SA Standards Board.* <http://standards.ieee.org/>. Copyright © 2015 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

En la práctica, la distancia "X" para el electrodo de potencial suele ser el 62% de la distancia del electrodo de corriente cuando el electrodo de corriente y de potencial están en la misma dirección. Esta distancia se basa en la posición teóricamente correcta para la medición de la impedancia del electrodo para un suelo con resistividad uniforme (IEEE-Std-81<sup>TM</sup>-2012, 2012).

Para medir la resistencia, la fuente de corriente se conecta entre el electrodo a tierra E del sistema y un electrodo de corriente situado a varios metros. El circuito de medición de potencial se conecta entre el electrodo a tierra E del sistema y un electrodo de potencial P, y las mediciones se realizan en distintos puntos del electrodo fuera del sistema. Este electrodo de potencial puede desplazarse hacia el electrodo de corriente en incrementos iguales de distancia, comenzando cerca el electrodo a tierra E, y las lecturas de resistencia obtenidas en los distintos puntos pueden representarse gráficamente en función de la distancia del electrodo a tierra : (IEEE Std 80<sup>TM</sup>-2013, 2015)

### Figura 18

*Potenciales de la superficie del suelo para distintas distancias "X"*



*Nota.* Adaptado de “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” (vol. 71, p. 117) por IEEE Power and Energy Society, 2015, United States of America. *IEEE-SA Standards Board*. <http://standards.ieee.org/>. Copyright © 2015 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

Con los datos de las mediciones de resistividad y resistencia obtenidos en el trabajo de campo, realizadas con el equipo de medición telurómetro Megabras MTD-20KWe de cuatro polos y teniendo en consideración los objetivos planteados en la presente tesis, a continuación, se describe por cada objetivo específico:

##### 4.1.1 Resistividad eléctrica del terreno

De acuerdo al método planteado se procede con la ejecución de la medida de la resistividad utilizando la metodología de Werner de espacios equidistantes, para lo cual tomamos mediciones en dos perfiles que se detalla a continuación:

- Se instala cuatro electrodos, en línea recta y con separación constante.
- Se introduce a 30 cm de profundidad y
- Se separa 1.5 m al inicio, aumentando esta distancia gradualmente en 3, 6, 9, 12 y 15 m, entre cada electrodo.

Se conectan los cables a los terminales y electrodos al equipo como sigue:

- Conductor del electrodo 1 al punto H.
- Conductor del electrodo 2 al punto S.
- Conductor del electrodo 3 al punto ES.
- Conductor del electrodo 4 al punto E.

**Figura 19**

*Conexión de los cables a los terminales y electrodos*



*Nota.* Equipo de medición telurómetro Megabras MTD-20KWe de cuatro polos utilizado para medir la resistividad del terreno.

Para el cálculo de la resistencia teórica se procede de acuerdo a lo recomendado por la norma (IEEE-Std-81<sup>TM</sup>-2012, 2012), utilizando la formula detallada anteriormente.

- **Perfil N°01**

Con los datos siguientes tomados en campo se procede a realizar el cálculo de la resistividad aparente.

**Tabla 2***Medición de la resistividad perfil 1*

Perfil	Lectura R ( $\Omega$ )	Distancia a (m)	Profundidad b (m)
1	15	1.5	0.3
	7.8	3	0.3
	2.7	6	0.3
	1.71	9	0.3
	0.76	12	0.3
	0.75	15	0.3

*Nota.* Se tiene las mediciones de resistencia del instrumento para las diferentes distancias del terreno del perfil 1.

Para la primera medición realizada se tiene los datos siguientes:

$a$  : 1.5 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 15  $\Omega$ .

Reemplazando en la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Se tiene el resultado siguiente para el primer punto.

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1.5 \times 15}{1 + \frac{2 \times 1.5}{\sqrt{1.5^2 + 4 \times 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{1.5^2 + 0.3^2}}} = 159.69 \Omega.m$$

Para el punto 2 se tiene los datos siguientes:

$a$  : 3.0 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 7.8  $\Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 3 \times 7.8}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{3^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{3^2 + 0.3^2}}} = 149.56 \Omega.m$$

Para el punto 3 se tiene los datos siguientes:

$a$  : 6.0 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 2.7  $\Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 6 \times 2.7}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{6^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{6^2 + 0.3^2}}} = 102.23 \Omega.m$$

Para el punto 4 se tiene los datos siguientes:

$a$  : 9.0 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 1.71  $\Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 9 \times 1.71}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{9^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{9^2 + 0.3^2}}} = 96.89 \Omega.m$$

Para el punto 5 se tiene los datos siguientes:

$a$  : 12.0 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 0.76  $\Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 12 \times 0.76}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{12^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{12^2 + 0.3^2}}} = 57.37 \Omega.m$$

Para el punto 6 de la trayectoria 1 se tiene los datos siguientes:

$a : 15.0 \text{ m.}$

$b : 0.3 \text{ m.}$

$R : 0.72 \Omega.$

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 15 \times 0.72}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{15^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{15^2 + 0.3^2}}} = 67.91 \Omega.m$$

En la tabla 3 se resumen los resultados obtenidos para la resistividad aparente del perfil 1.

**Tabla 3**

*Resistividad del perfil 1*

Dirección	Lectura R ( $\Omega$ )	Distancia a (m)	Profundidad b (m)	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
1	15	1.5	0.3	150.69
	7.8	3	0.3	149.56
	2.7	6	0.3	102.23
	1.71	9	0.3	96.89
	0.79	12	0.3	59.63
	0.72	15	0.3	67.91

*Nota.* La resistividad aparente obtenida de las mediciones de campo para el perfil N°1 varia como se puede observar entre 150.69 ( $\Omega$ -m), siendo esta la máxima y una resistividad mínima de 59.63 ( $\Omega$ -m). Se puede observar que existe una variación de 40%, debido a esto concluimos que la resistividad del terreno para este perfil no es homogénea.

- **Perfil N°02**

Con los datos siguientes tomados en campo se procede a realizar el cálculo de la resistividad aparente para la trayectoria N°02.

**Tabla 4***Medición de la resistividad perfil 2*

Perfil	Lectura R ( $\Omega$ )	Distancia a (m)	Profundidad b (m)
2	14.40	1.5	0.3
	4.7	3	0.3
	2.21	6	0.3
	1.26	9	0.3
	0.79	12	0.3
	0.81	15	0.3

*Nota.* Se tiene las mediciones de resistencia del instrumento para las diferentes distancias del terreno del perfil 2.

Para la primera medición realizada se tiene los datos siguientes:

$a$  : 1.5 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 14.4  $\Omega$ .

Se tiene el resultado siguiente para el primer punto.

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 1.5 \times 14.4}{1 + \frac{2 \times 1.5}{\sqrt{1.5^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{1.5^2 + 0.3^2}}} = 144.66 \Omega.m$$

Para el punto 2 se tiene los datos siguientes:

$a$  : 3.0 m.

$b$  : 0.3 m.

$R$  : 4.7  $\Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 3 \times 4.7}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{3^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{3^2 + 0.3^2}}} = 90.12 \Omega.m$$

Para el punto 3 se tiene los datos siguientes:

$a : 6.0 \text{ m.}$

$b : 0.3 \text{ m.}$

$R : 2.21 \Omega.$

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 6 \times 2.21}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{6^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{6^2 + 0.3^2}}} = 83.68 \Omega. m$$

Para el punto 4 se tiene los datos siguientes:

$a : 9.0 \text{ m.}$

$b : 0.3 \text{ m.}$

$R : 1.26 \Omega.$

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 9 \times 1.26}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{9^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{9^2 + 0.3^2}}} = 71.39 \Omega. m$$

Para el punto 5 se tiene los datos siguientes:

$a : 12.0 \text{ m.}$

$b : 0.3 \text{ m.}$

$R : 0.79 \Omega.$

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 12 \times 0.79}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{12^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{12^2 + 0.3^2}}} = 59.63 \Omega. m$$

Para el punto 6 de la trayectoria 2 se tiene los datos siguientes:

$a : 15.0 \text{ m.}$

$b : 0.3 \text{ m.}$

$R : 0.81 \Omega$ .

Se tiene el siguiente resultado:

$$\rho = \frac{4 \times \pi \times 15 \times 0.81}{1 + \frac{2 \times 3}{\sqrt{15^2 + 4 * 0.3^2}} - \frac{1.5}{\sqrt{15^2 + 0.3^2}}} = 76.39 \Omega.m$$

Resumimos los resultados en la tabla 5:

**Tabla 5**

*Resistividad del perfil 2*

Trayectoria	Lectura R ( $\Omega$ )	Distancia a (m)	Profundidad b (m)	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
2	14.40	1.5	0.3	144.66
	4.7	3	0.3	90.12
	2.21	6	0.3	83.68
	1.26	9	0.3	71.39
	0.79	12	0.3	59.63
	0.81	15	0.3	76.39

*Nota.* La resistividad aparente obtenida de las mediciones de campo para el perfil N°2 varia como se puede observar entre 144.66 ( $\Omega$ -m), siendo esta la máxima y una resistividad mínima de 59.63 ( $\Omega$ -m). Se puede observar que existe una variación de 41%, debido a esto concluimos que la resistividad del terreno para este perfil no es homogénea.

### A. Modelado eléctrico del terreno

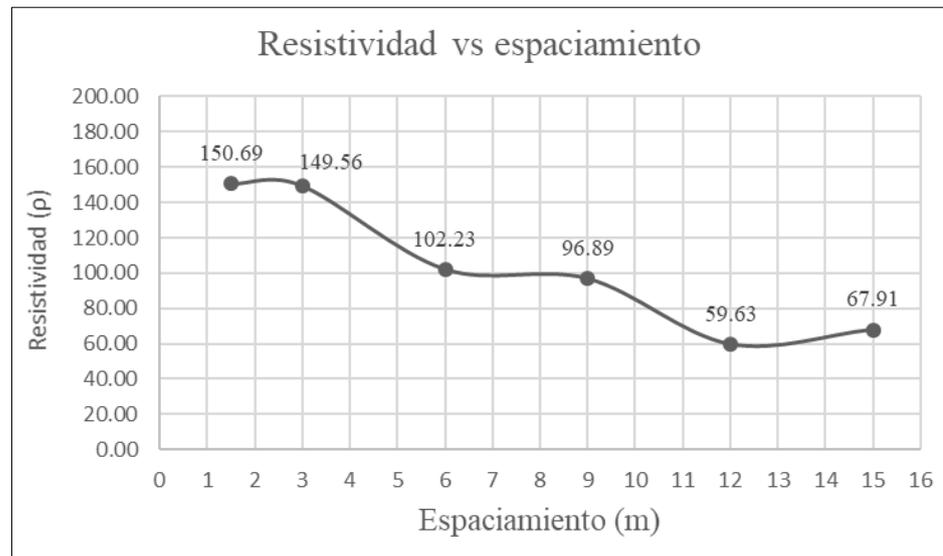
En las mediciones de resistividad; se tiene que, la variación en porcentaje de máximo y mínimo es muy notable, de 41.2%, debido a esta variación aplicamos el método gráfico de Sunde para modelado de suelo de dos capas para la dirección N° 1, se procede de acuerdo al método recomendado.

- **Perfil 1:**

- a) Trazamos el gráfico de la resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje y frente a la distancia entre clavijas en el eje "x".

**Figura 20**

*Resistividad aparente vs distancia perfil 1*



- b) Estimamos  $\rho_1$  y  $\rho_2$  a partir de los valores máximo y mínimo de la gráfica de la resistividad aparente.

Se tiene:

$$\rho_1 = 150.69 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 59.63 \Omega \cdot m$$

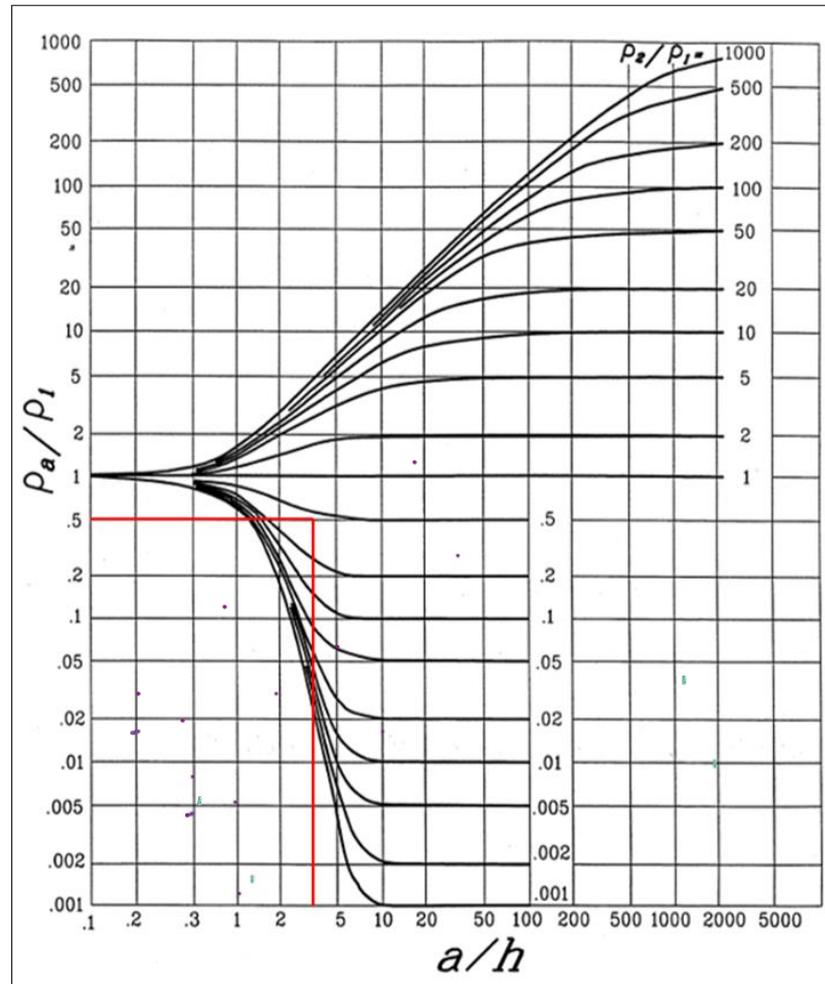
- c) Calculamos  $\rho_2/\rho_1$  y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{59.63}{150.69} = 0.39$$

- d) Seleccionamos el valor de  $\rho^a/\rho_1$  en el eje "y", dentro de la región inclinada de la curva  $\rho^a/\rho_1$  en el gráfico de Sunde.

**Figura 21**

*Gráfico de Sunde perfil 1*



Nota. Del gráfico el valor de  $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0.5$

- e) El valor correspondiente de  $\frac{a}{h}$  en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 3$$

- f) Calculamos  $\rho_a$  multiplicando el valor seleccionado,  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ , por  $\rho_1$ .

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0.5$$

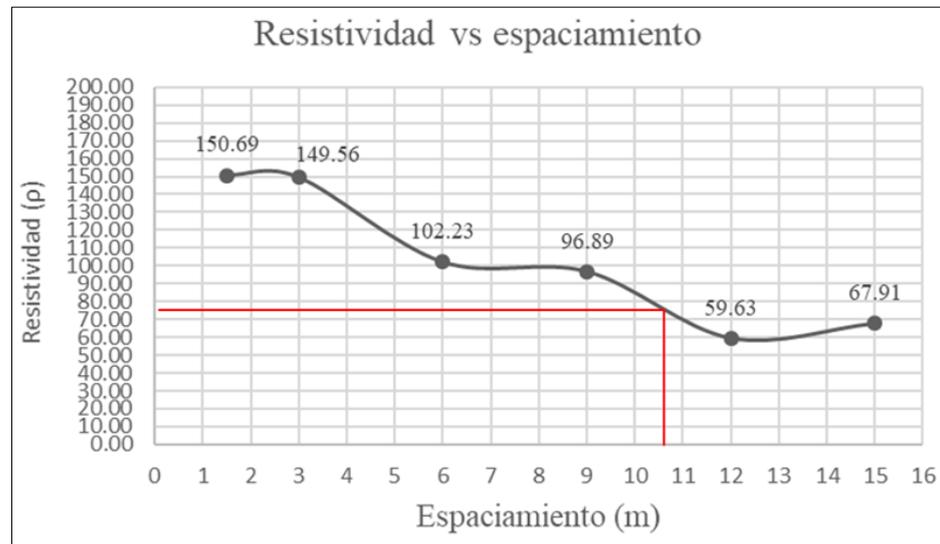
$$\rho_a = 0.5 * \rho_1 = 0.5 * 150.69 = 75.34 \Omega \cdot m$$

- g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente  $\rho_a$  calculado en el paso f).

$$\rho_a = 75.34 \Omega. m$$

**Figura 22**

*Resistividad aparente perfil 1*



*Nota.* La distancia  $a = 10.6 m$

- h) Calculamos  $h$ , la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada,  $a$ .

$$\frac{a}{h} = 3$$

$$h = \frac{a}{2} = \frac{10.6}{3} = 3.53 m$$

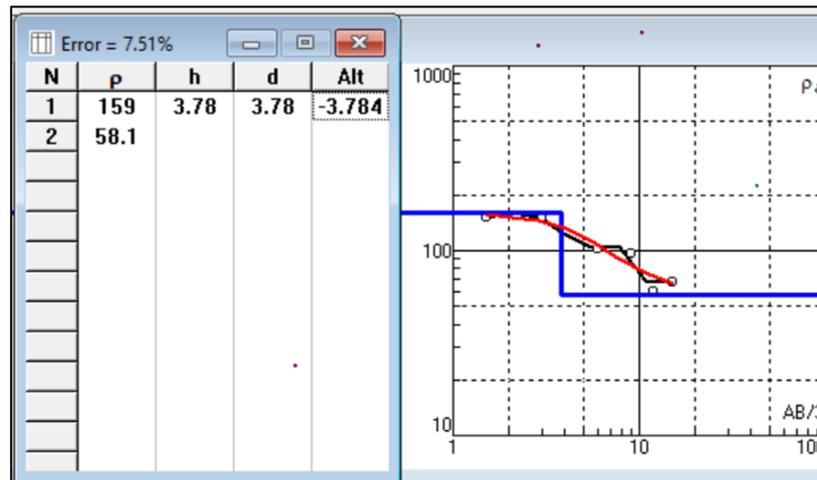
Los resultados obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial  $\rho_1 = 150.69 \Omega. m$
- Resistividad de la capa más profunda  $\rho_2 = 59.63 \Omega. m$
- Profundidad de la capa superficial  $h = 3,53 m$

Con el software IP12WIN, determinamos la resistividad de diseño; para el perfil 1.

**Figura 23**

Valores de resistividad aparente perfil 1 con IP12WIN



- Resistividad de la capa superficial  $\rho_1 = 159 \Omega. m$
- Resistividad de la capa más profunda  $\rho_2 = 58.1 \Omega. m$
- Profundidad de la capa superficial  $h = 3,78 m$
- Error  $\% = 7.51$  (aceptable)

Comparando los valores obtenidos con el método grafico de Sunde y con el Software IP12WIN, se puede verificar que son muy similares para el perfil 1.

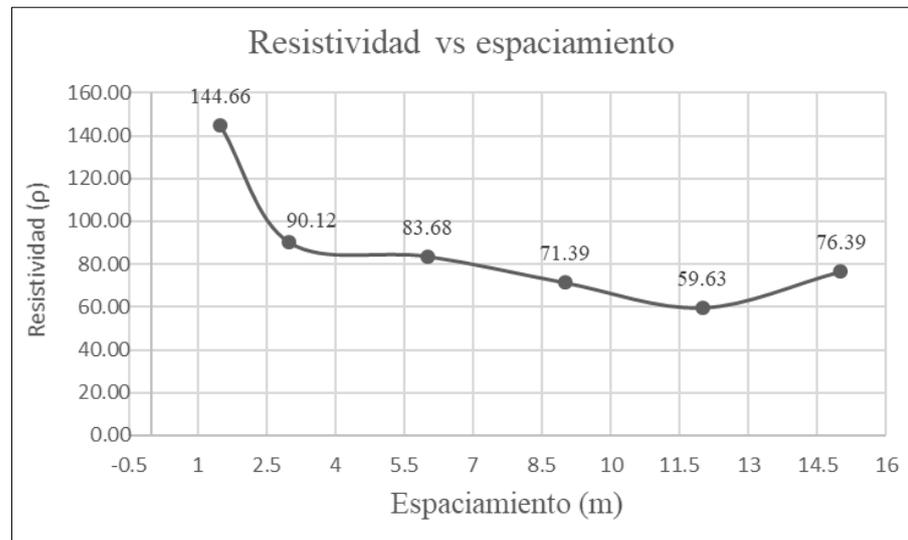
- **Perfil 2:**

Para el perfil 2, se tiene los resultados siguientes:

- a) Trazamos el gráfico de la resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje y frente a la distancia entre clavijas en el eje "x".

**Figura 24**

*Resistividad aparente vs distancia perfil 2*



- b) Estimamos  $\rho_1$  y  $\rho_2$  a partir de los valores máximo y mínimo de la gráfica de la resistividad aparente.

Se tiene:

$$\rho_1 = 144.66 \Omega \cdot m$$

$$\rho_2 = 59.63 \Omega \cdot m$$

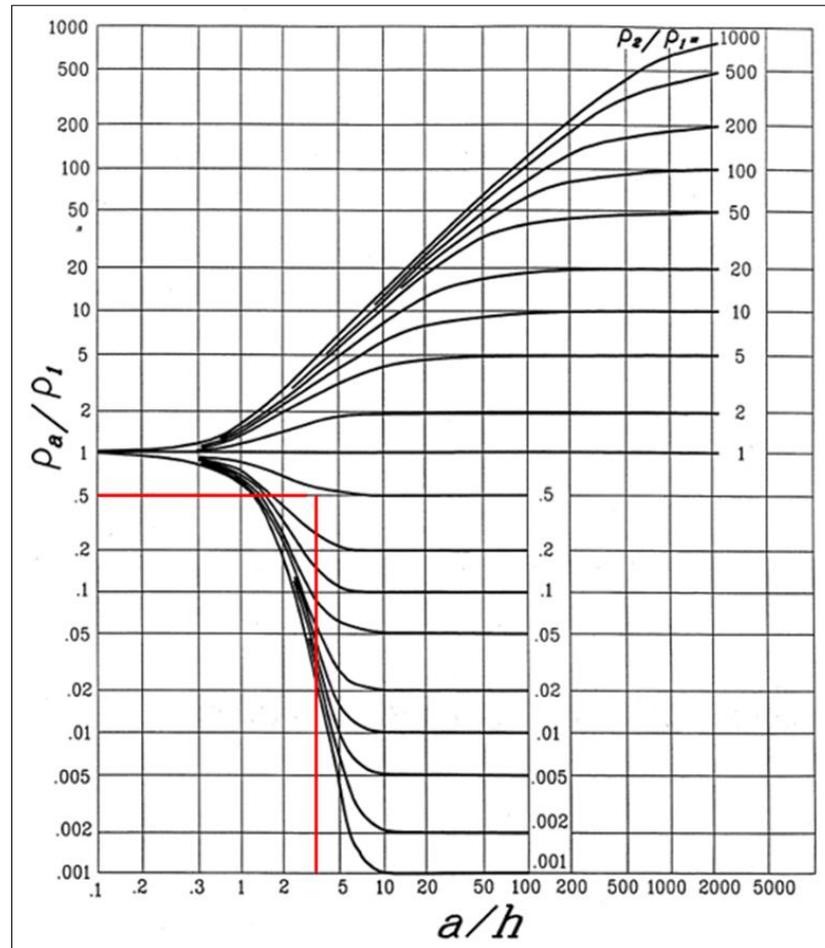
- c) Calculamos  $\rho_2/\rho_1$  y seleccionamos una curva en el gráfico de Sunde.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{59.63}{144.66} = 0.41$$

- d) Seleccionamos el valor de  $\rho_a/\rho_1$  en el eje “y”, dentro de la región inclinada de la curva  $\rho_2/\rho_1$  en el gráfico de Sunde.

**Figura 25**

Gráfico de Sunde perfil 2



Nota. Del gráfico el valor de  $\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0.5$

- e) El valor correspondiente de  $\frac{a}{h}$  en el eje x.

$$\frac{a}{h} = 3.5$$

- f) Calculamos  $\rho_a$  multiplicando el valor seleccionado,  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ , por  $\rho_1$ .

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 0.5$$

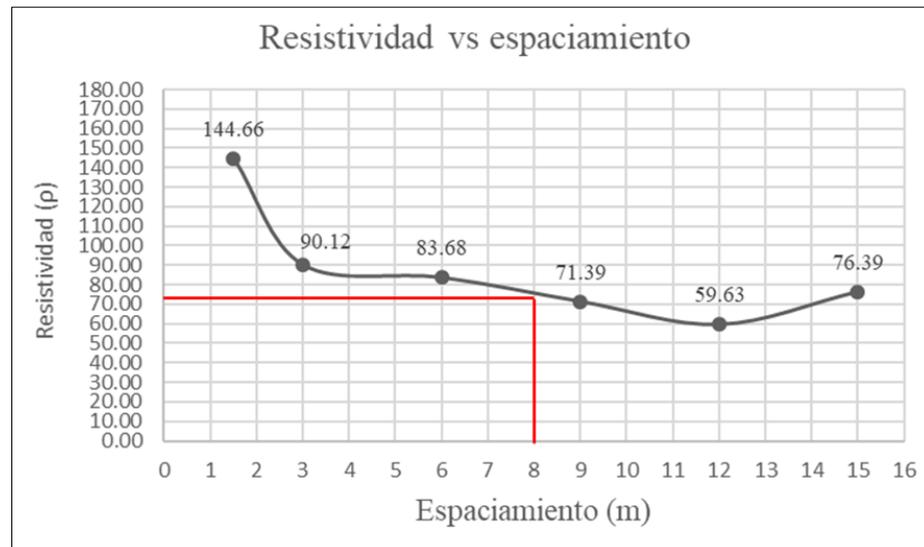
$$\rho_a = 0.5 * \rho_1 = 0.5 * 144.66 = 72.33 \Omega.m$$

- g) El espaciado de las clavijas (a) correspondiente en el gráfico de resistividad aparente  $\rho_a$  calculado en el paso f).

$$\rho_a = 72.33 \Omega. m$$

**Figura 26**

*Resistividad aparente perfil 2*



*Nota.* La distancia  $a = 8 m$

- h) Calculamos  $h$ , la profundidad del nivel superior, utilizando la separación de sonda apropiada,  $a$ .

$$\frac{a}{h} = 3.5$$

$$h = \frac{a}{3.5} = \frac{8.5}{3.5} = 2.42 m$$

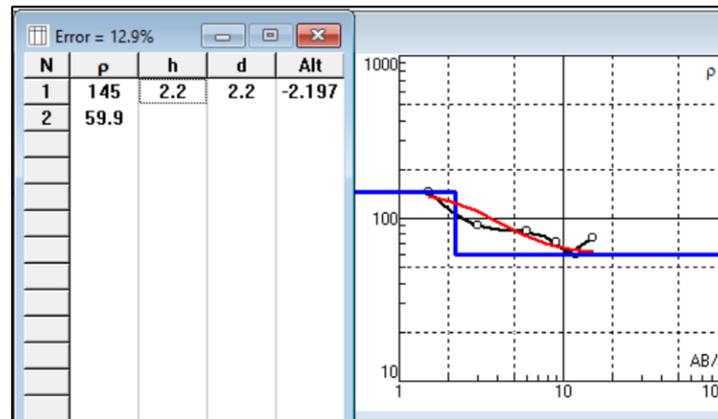
Los resultados obtenidos para este caso son los siguientes:

- Resistividad de la capa superficial  $\rho_1 = 144.77 \Omega. m$
- Resistividad de la capa más profunda  $\rho_2 = 59.63 \Omega. m$
- Profundidad de la capa superficial  $h = 2,42 m$

Con el software IP12WIN, determinamos la resistividad de diseño; para el perfil 2.

**Figura 27**

Valores de resistividad aparente perfil 2 con IP12WIN

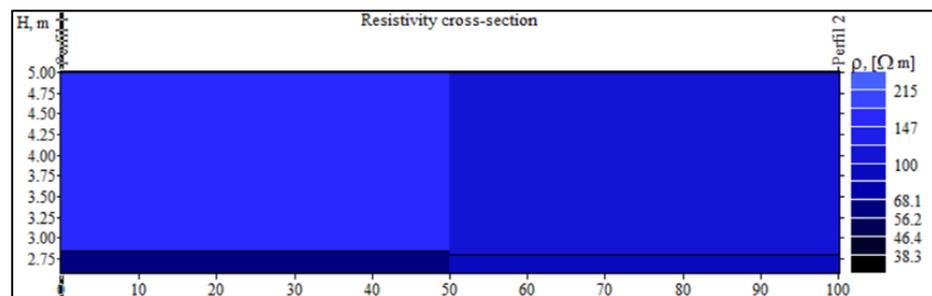


- Resistividad de la capa superficial  $\rho = 145 \Omega \cdot m$
- Resistividad de la capa más profunda  $\rho_2 = 59.9 \Omega \cdot m$
- Profundidad de la capa superficial  $h = 2, 2 m$
- Error  $\% = 12.9$  (aceptable)

Comparando los valores obtenidos con el método gráfico de Sunde y con el Software IP12WIN, se puede verificar que son muy similares para el perfil 2.

**Figura 28**

Modelado del terreno con IP12WIN



*Nota.* Apreciamos la simulación del modelamiento de la resistividad del terreno a diferentes profundidades.

## B. Resistencia teórica de puesta a tierra

La resistencia para un electrodo de longitud “L” y radio “r” se calcula mediante la fórmula.

$$R = \frac{\rho_2}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right)$$

Donde:

- $R$ : Resistencia de tierra en  $\Omega$
- $r$ : Radio del electrodo = 0.016 m
- $l$ : Longitud de la varilla m = 2.4 m
- $\rho$ : Resistividad del suelo en  $\Omega \cdot m$

$$\rho = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2}$$

- $\rho_{a(max)}$ : es el valor máximo de resistividad aparente (a partir de datos medidos) en  $\Omega \cdot m$ .
- $\rho_{a(min)}$ : es el valor mínimo de resistividad aparente (a partir de datos medidos) en  $\Omega \cdot m$ .

$$\rho = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2}$$

Entonces para el perfil 1 se tiene:

$$\rho = \frac{150.69 + 59.63}{2} = 105.16 \Omega \cdot m$$

Con este valor calculamos la resistencia teórica del perfil N°2

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) = \frac{105.16}{2\pi * 2.4} \left( \ln \frac{4 * 2.4}{0.016} - 1 \right) = 37.64 \Omega$$

Para el perfil N°2:

$$\rho = \frac{144.66 + 59.63}{2} = 102.15 \Omega \cdot m$$

Con este valor calculamos la resistencia teórica del perfil N°1

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{r_1} - 1 \right) = \frac{102.15}{2\pi * 2.4} \left( \ln \frac{4 * 2.4}{0.016} - 1 \right) = 36.56 \Omega$$

Se tiene una resistencia de puesta a tierra teórica de 36.56 Ohmios.

#### 4.1.2 Resistencia del pozo a tierra tratado

Para determinar la resistencia del pozo a tierra tratado con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos; para lo cual, se emplea el método de la caída de potencial y con el siguiente procedimiento descrito en el manual de operación del equipo:

- Conectar el electrodo de prueba a los puntos C1 y P1.
- Llevar el electrodo C (cable rojo), tan lejos como sea posible del electrodo bajo prueba E (cable verde). Conectar esta varilla al punto C2 del equipo.
- Llevar el electrodo de potencial P (cable amarillo), a la mitad entre E y C, sobre la recta que los une. Conectar el cable de esta varilla al punto P2 del equipo.
- Realizar la medida, ésta es la resistencia R1.
- Poner el electrodo (P) a una distancia igual al 40% de EC desde E y tomar una segunda lectura, (R2).

Se conectan los cables a los terminales y electrodos al equipo como sigue:

- Conductor del electrodo 1 al punto H.
- Conductor del electrodo 2 al punto S.
- Conductor del electrodo 3 al punto E.

#### Figura 29

*Conexión medida de resistencia*



Nota. Equipo de medición telurómetro Megabras MTD-20KWe utilizado para medir la resistencia del pozo a tierra.

Utilizando el método de la caída de potencial, descrito en la norma (IEEE Std 80<sup>TM</sup>-2013, 2015); realizamos las mediciones del pozo sin tratamiento, teniendo las siguientes mediciones:

**Tabla 6**

*Medidas de la resistencia del pozo sin tratamiento*

Distancia (m)	Lectura R( $\Omega$ )
10	37.9
14	38.0
16	39.9
20	39.8
24	43.4
28	43.6
32	50.3

Con las mediciones realizadas en campo y utilizando el método de la caída de potencial se puede determinar la resistencia del grafico siguiente:

**Figura 30**

*Resistencia del pozo sin tratar*



*Nota.* La resistencia del pozo sin tratamiento es de 40 Ohmios, de acuerdo al método de la caída de potencial. Se puede apreciar que es muy similar a la resistencia teórica de 37 Ohmios.

**Figura 31**

*Tratamiento del pozo a tierra*



*Nota.* Tratamiento del pozo a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos (guano de alpaca y llama)

Realizamos las mediciones del pozo con tratamiento que consiste en la adición de estiércol de camélidos sudamericanos en proporciones iguales (alpaca y llama).

**Tabla 7**

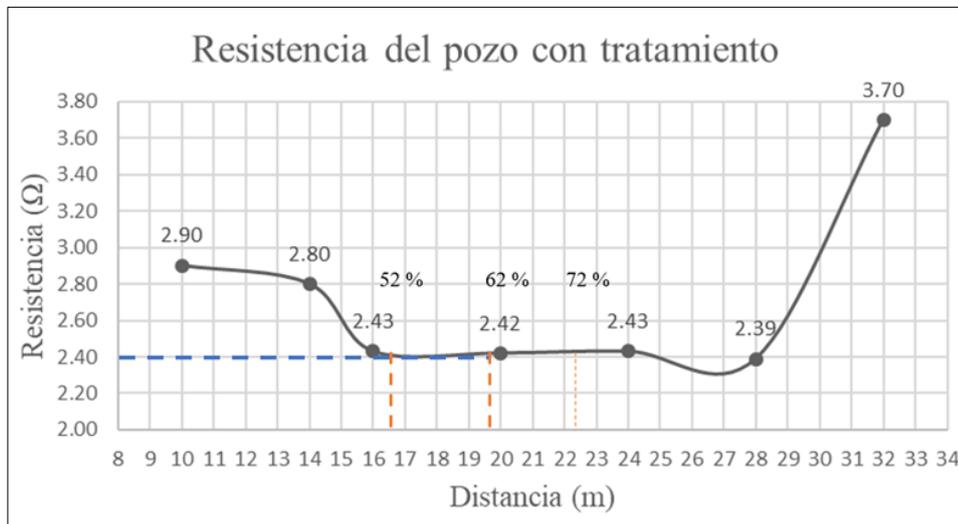
*Medidas de la resistencia del pozo con tratamiento*

Distancia (m)	Lectura R( $\Omega$ )
10	2.90
14	2.80
16	2.43
20	2.42
24	2.43
28	2.39
32	3.70

Con estos datos se procede a realizar la gráfica correspondiente que se muestra a continuación.

**Figura 32**

*Resistencia del pozo con tratamiento*



*Nota.* En el gráfico, la resistencia del pozo con tratamiento es de 2.4 Ohmios, de acuerdo al método de la caída de potencial.

#### 4.1.3 Contrastación de hipótesis

Con respecto a la contrastación de hipótesis planteadas en el presente estudio se tiene el procedimiento que se detalla a continuación.

##### A. Análisis inferencial

Existe la correlación entre el estiércol de los camélidos sudamericanos domésticos y la mejora de la resistencia de los pozos de puesta a tierra

Se tiene las siguientes hipótesis específicas:

##### B. Hipótesis específica 1

La resistividad del terreno está relacionada con la resistencia del pozo a tierra.

Para las variables relacionadas utilizaremos el coeficiente de correlación de Pearson. Entonces se tiene lo siguiente:

La hipótesis alterna:

- **H<sub>1</sub>**: La resistividad del terreno influirá en la resistencia del pozo a tierra.

La hipótesis nula

- **H<sub>0</sub>**: La resistividad del terreno no influirá en la resistencia del pozo a tierra.
- **Nivel de significancia**

$\alpha = 0,05$  o 5%. Es la probabilidad de cometer un error

- **Nivel de confianza**

$1 - \alpha = 0,95$  o 95%. Probabilidad de que la estimación de un parámetro en una muestra sea el valor real en la población.

- **Estadístico de prueba**

Coefficiente de correlación de Pearson

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

n : número de pares de muestra

$x_i$  : valor de variable resistividad

$y_i$  : valor de variable resistencia

- **Regla de decisión**

Si: p valor  $\leq 0,05$  se **rechaza** la hipótesis nula.

Si: p valor  $> 0,05$  se **acepta** la hipótesis nula

- **Calculo de la prueba**

Con el software estadístico INFOSTAT se tiene el siguiente resultado:

- **Coefficiente de correlación**

El coeficiente de correlación de Pearson.

**Tabla 8**

*p* valor hipótesis 1

Correlación de Pearson				
Variable (1)	Variable (2)	n	Pearson	p-valor
Resistividad	Resistividad	6	1.00	<0.0001
Resistividad	Resistencia	6	1.00	<0.0001
Resistencia	Resistividad	6	1.00	<0.0001
Resistencia	Resistencia	6	1.00	<0.0001

- **Decisión**

Como el *p* valor es 0,0001 y este valor es menor que 0,05 entonces se rechaza la hipótesis nula.

- **Conclusión**

Se acepta la hipótesis alterna, es decir: La resistividad del terreno influirá en la resistencia del pozo a tierra.

### C. **Hipótesis específica 2**

La resistencia del pozo a tierra, mejora con el estiércol de camélidos sudamericanos domésticos.

Puesto que queremos comparar la variable sin tratamiento y la variable con tratamiento en este caso para la prueba de la segunda hipótesis se utiliza la distribución *t* de Student, para muestras emparejadas que viene dado por la expresión siguiente:

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{S_d / \sqrt{n}}$$

Donde

$\bar{d}$  : Promedio de las diferencias de las mediciones muestrales.

$d_0$  : Media poblacional.

$S_d$  : Desviación estándar de estas diferencias.

$n$  : número de elementos de la muestra.

$v = n - 1$  grados de libertad

De acuerdo a lo planteado se tiene para las hipótesis planteadas.

- $H_0$ : La resistencia del sistema de puesta a tierra, no mejora con el tratamiento.
- $H_1$ : La resistencia del sistema de puesta a tierra, mejora con el tratamiento.

Se tiene los datos siguientes:

**Tabla 9**

*Datos de las mediciones de resistencia*

Sin tratamiento	Con tratamiento
37.9	2.9
38.0	2.8
39.9	2.4
39.8	2.4
43.4	2.4
43.6	2.4
50.3	3.7

La prueba a aplicar es de dos colas.

$$\alpha = 5\% \Rightarrow \alpha = 0,05$$

Por ser de dos colas entonces

$$\alpha = \frac{0,05}{2} = 0.025$$

Se tiene en cuenta lo siguiente:

$v = 7 - 1 = 6$  grados de libertad.

**Tabla 10**

*Valores críticos de la distribución t de Student*

	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.025</b>	<b>0.010</b>	<b>0.005</b>
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	<b>2.447</b>	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169

*Nota.* Para 6 grados de libertad y  $\alpha = 0,025$ , de los valores críticos de la distribución t de Student

Se tiene lo siguiente:

$$t_{\alpha/2} = 0,025 = 2,447$$

El valor 2,447 es el área de aceptación de la hipótesis nula y el área a la derecha de 2,447 representa el área de rechazo de la hipótesis nula.

Con la aplicación de Excel, se tiene el siguiente resultado:

**Tabla 11**

*Valor de estadístico t, resistencia*

	<i>Sin tratamiento</i>	<i>Con tratamiento</i>
Media	41.84285714	2.724285714
Varianza	19.21619048	0.227695238
Observaciones	7	7
Coefficiente de correlación de Pearson	0.59086888	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	25.12266681	
P(T<=t) una cola	1.30946E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.943180281	
P(T<=t) dos colas	2.61892E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.446911851	

*Nota.* El valor de  $t$  calculado es 25,12 el cual es mayor al valor  $t=2,447$ ; por tanto, cae en la región de rechazo de la hipótesis nula; con lo cual se rechaza la hipótesis nula; aceptando la hipótesis alterna, es decir que, la resistencia del sistema de puesta a tierra, mejora con el tratamiento.

- **Conclusión**

Se acepta la hipótesis alterna, es decir: la resistencia del sistema de puesta a tierra, mejora con el tratamiento.

## 4.2 Discusión

Con el método de Werner planteado en la presente investigación se tiene una resistividad eléctrica del terreno en el perfil N°1 de 105.16  $\Omega$ -(m) y para el perfil N°2 de 102.15  $\Omega$ -(m). En las mediciones para la resistencia utilizando el método de la caída de potencial para el pozo sin tratamiento se tiene como resultado 40  $\Omega$ , y para el pozo con tratamiento utilizando el estiércol de camélidos sudamericanos se tiene como resultado 2.4  $\Omega$ ; por lo tanto, observamos que existe una mejoría notoria en la resistencia del pozo con tratamiento. Otros autores como:

Ghomi et al. (2022) presenta una investigación exhaustiva de los efectos de la estructura del suelo de puesta a tierra de la subestación en los transitorios de conmutación/relámpago. sobre los transitorios de conmutación/rayo; esta evaluación se

realiza considerando dos estructuras de suelo: (1) un suelo uniforme y (2) un suelo con una estructura en capas.

Zhang et al. (2020) indica que, en la actualidad, la resistencia de puesta a tierra, está estrechamente relacionada con la resistividad del suelo, es un indicador importante para evaluar el rendimiento de la puesta a tierra. La resistencia de puesta a tierra en suelo de diferente resistividad es equivalente a la resistencia de puesta a tierra en suelo de resistividad de referencia para diagnosticar el grado de corrosión según los criterios de diagnóstico unificados. Los resultados de los cálculos y los experimentos validan la precisión del método propuesto.

Camara et al. (2020) menciona que la seguridad de un sistema de puesta a tierra desempeña un papel vital en la red de transmisión y distribución para la operatividad en la mayor parte de las instalaciones eléctricas. La aplicación de relés de protección diferencial y de sobreintensidad es uno de los métodos preferidos en los sistemas de puesta a tierra. En este estudio se propone un nuevo estudio para investigar el rendimiento de la seguridad del sistema de puesta a tierra. La metodología se demuestra meticulosamente mediante amplios experimentos de campo con materiales naturales y químicos de mejora de la puesta a tierra. Se realizó una comparación de rendimiento entre los materiales de mejora naturales y químicos bajo diferentes niveles de humedad y de tensión. Se aplicaron varios voltajes ajustables en el rango entre 0,85 y 3,76 kV a tres varillas de cobre colocadas verticalmente en diferentes materiales de puesta a tierra. Los resultados de los experimentos de campo se analizaron mediante la transformada wavelet discreta. Los experimentos demuestran que los materiales ofrecen una baja resistividad del suelo alrededor de los electrodos, son una solución rentable para los suelos de alta resistividad y resultan eficaces en términos de costes. y cumplen las normas de seguridad IEEE 80.

Alipio et al. (2019) investiga el impacto de los parámetros eléctricos del suelo dependientes de la frecuencia en la respuesta al rayo de los sistemas típicos de puesta a tierra de aerogeneradores. Se demuestra que la dependencia de la frecuencia de los parámetros del suelo es responsable de disminuir el aumento del potencial de tierra y, por tanto, la impedancia de impulso y el coeficiente de impulso de los sistemas de puesta a tierra. Este efecto es más pronunciado para suelos de alta resistividad e impulsos de corriente rápidos. También se demuestra que, considerando las dimensiones típicas de los



sistemas de puesta a tierra de aerogeneradores reales y suelos con una resistividad superior a  $300 \Omega\text{-m}$ , se espera que la impedancia de impulso observada por cada aerogenerador sea inferior a la resistencia de puesta a tierra de baja frecuencia.

## CONCLUSIONES

- Se analizó el comportamiento del estiércol de camélidos sudamericanos domésticos en el tratamiento de los pozos de puesta a tierra; en el campo, se realizaron las mediciones de la resistencia de los pozos a tierra tanto, en este caso el primer pozo sin tratamiento y el segundo con tratamiento utilizando el estiércol de los camélidos sudamericanos; del análisis, se puede concluir que la utilización del estiércol mejora el comportamiento de la resistencia de los pozos a tierra; además de ser un compuesto orgánico abundante en las zonas altiplánicas representando una ventaja también para el cuidado del medio ambiente.
- Se determinó la resistividad eléctrica del terreno mediante método de Werner de espacios equidistantes conocido como el método de los cuatro puntos, de las mediciones realizadas en campo se ha realizado el modelamiento del terreno mediante el método gráfico de Sunde para terrenos de dos capas, se analizó la resistividad en dos direcciones; en el primer perfil se ha tenido una resistividad aparente de 150.69 Ohmios por metro y una altura de la capa superficial de 3.53 metros y para la segunda capa se tiene 59.63 Ohmios por metro con esto se tiene una resistividad de diseño de 105.16 Ohmios por metro; mientras que para el segundo perfil se tiene una resistividad de 144.77 Ohmios por metro con una altura de la capa superficial de 2.2 metros y una resistividad de 59.63 Ohmios por metro para la capa más profunda.
- Se ha definido la resistencia del pozo a tierra tratado con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos, se verifica que para el pozo sin tratamiento se tiene una resistencia de 40 Ohmios; mientras que, para el pozo tratado con estiércol de camélidos sudamericanos se tiene como resultado de 2.4 Ohmios, lo que representa una mejora significativa en la resistencia del pozo a tierra; por lo cual, se concluye que la utilización del estiércol de los camélidos sudamericanos en el tratamiento de los pozos a tierra es beneficioso para el mejoramiento de la resistencia del pozo a tierra.



## RECOMENDACIONES

- En zonas con terrenos difíciles es posible realizar estudios contemplando otros materiales existentes como las arcillas y la instalación de contrapesos para poder mejorar la resistencia del pozo y de esta manera poder cumplir con las disposiciones de seguridad recomendadas.
- A los tesisistas realizar el análisis económico de la instalación de los pozos de puesta a tierra tratados con el estiércol de camélidos sudamericanos en combinación con compuestos mejoradores conocidos como es el caso del cemento conductor para zonas donde se presente resistividades altas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alipio, R., Conceição, D., De Conti, A., Yamamoto, K., Dias, R. N., y Visacro, S. (2019). A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 175(May), 105927. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105927>
- Alipio, R., De Conti, A., Duarte, N., y Correia de Barros, M. T. (2021). Bare versus insulated conductors for improving the lightning response of interconnected wind turbine grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 197(May), 107320. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107320>
- Alsharari, B., Olenko, A., y Abuel-Naga, H. (2020). Modeling of electrical resistivity of soil based on geotechnical properties. *Expert Systems with Applications*, 141, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112966>
- An, N., Tang, C. S., Cheng, Q., Wang, D. Y., y Shi, B. (2020). An experimental application of electrical resistivity/resistance method (ERM) to characterize the evaporation process of sandy soil. *Physics and Chemistry of the Earth*, October 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102873>
- Androvitsaneas, V. P., Gonos, I. F., y Stathopoulos, I. A. (2015). Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.032>
- Araújo, M. A., Flauzino, R. A., Altafim, R. A. C., Batista, O. E., y Moraes, L. A. (2015). Practical methodology for modeling and simulation of a lightning protection system using metal-oxide surge arresters for distribution lines. *Electric Power Systems Research*, 118, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.017>
- Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, E. G. E. (2010). Practical Evaluation of Ground Enhancing Compounds for. *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, m*, 3–6.
- Batista, R., Caetano, C. E. F., Paulino, J. O. S., Boaventura, W. C., Lopes, I. J. S., y Cardoso, E. N. (2020). A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models. *Electric Power Systems*

- Research*, 180(March 2019), 106129. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106129>
- Batista, Raphael, y Paulino, J. O. S. (2021). Computing grounding resistance and impedance of horizontal electrodes parallel or perpendicular to the interface of a vertically stratified soil using transmission line theory. *Electric Power Systems Research*, 194(February 2020). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107060>
- Bonavia, N., y McGregor, B. A. (2021). Digestion, faecal grain loss and energy requirements of Huacaya alpacas fed lucerne chaff, oat chaff and whole grain barley diets. *Small Ruminant Research*, 201(August 2020), 106444. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106444>
- Buvat, S., Thiesson, J., Michelin, J., Nicoullaud, B., Bourennane, H., Coquet, Y., y Tabbagh, A. (2014). Multi-depth electrical resistivity survey for mapping soil units within two 3ha plots. *Geoderma*, 232–234, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.034>
- Caetano, C. E. F., Lima, A. B., Paulino, J. O. S., Boaventura, W. C., y Cardoso, E. N. (2018). A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding. *Electric Power Systems Research*, 159, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.022>
- Cai, Y., Ji, H., Wang, D., Lei, X., Sun, Y., y Yuan, S. (2021). Optimal construction method and demonstration application of multi-in-one station grounding system. *Global Energy Interconnection*, 4(5), 520–530. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2021.11.005>
- Camara, M., Atalar, F., y Yilmaz, A. E. (2020). A new grounding cake to improve the safety performance of grounding systems. *Journal of Electrostatics*, 108(April), 103521. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103521>
- Choi, J. H., y Lee, B. H. (2012). An analysis of conventional grounding impedance based on the impulsive current distribution of a horizontal electrode. *Electric Power Systems Research*, 85, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.07.005>
- Dafalla, M. A., y AlFouzan, F. A. (2012). Influence of physical parameters and soil chemical composition on electrical resistivity: A guide for geotechnical soil profiles. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(4), 3191–3204.

[https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)13946-0](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)13946-0)

- Datsios, Z. G., y Mikropoulos, P. N. (2017). Safety performance evaluation of typical grounding configurations of MV/LV distribution substations. *Electric Power Systems Research*, 150, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.016>
- de Araújo, A. R. J., Colqui, J. S. L., de Seixas, C. M., Kurokawa, S., Salarieh, B., Pissolato Filho, J., y Kordi, B. (2021). Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil. *Electric Power Systems Research*, 198(May). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107364>
- de Araújo, A. R. J., de Azevedo, W. L. M., Colqui, J. S. L., Kurokawa, S., y Filho, J. P. (2023). Harmonic grounding impedance of rods in horizontally stratified soils using ABCD-matrix approach. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 3(January). <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100102>
- Faleiro, E., Asensio, G., Denche, G., y Moreno, J. (2022). A fast method to compute the grounding resistance of a coated electrode using the coated electrode equivalent radius. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137, 107879. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107879>
- Gazzana, D. S., Bretas, A. S., Dias, G. A. D., Telló, M., Thomas, D. W. P., y Christopoulos, C. (2014). A study of human safety against lightning considering the grounding system and the evaluation of the associated parameters. *Electric Power Systems Research*, 113, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.015>
- Gazzana, D. S., Smorgonskiy, A., Mora, N., Sunjerga, A., Rubinstein, M., y Rachidi, F. (2018). An experimental field study of the grounding system response of tall wind turbines to impulse surges. 160, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.02.020>
- Ghania, S. M. (2019). Grounding systems under lightning surges with soil ionization for high voltage substations by using two layer capacitors (TLC) model. *Electric Power Systems Research*, 174(May), 105871. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105871>
- Ghomi, M., Faria da Silva, F., Shayegani Akmal, A. A., y Leth Bak, C. (2022). Transient

- overvoltage analysis in the medium voltage substations based on full-wave modeling of two-layer grounding system. *Electric Power Systems Research*, 211(May), 108139. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108139>
- Gingine, V., Dias, A. S., y Cardoso, R. (2016). Compaction Control of Clayey Soils Using Electrical Resistivity Charts. *Procedia Engineering*, 143(Ictg), 803–810. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.130>
- Gonçalves, M. F. B. R., da Costa, E. G., Andrade, A. F., Brito, V. S., Lira, G. R. S., y Xavier, G. V. R. (2019). Grounding system models for electric current impulse. *Electric Power Systems Research*, 177(June), 105981. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105981>
- Guizán, R., Colominas, I., París, J., Couceiro, I., y Navarrina, F. (2022). Numerical analysis and safety design of grounding systems in underground compact substations. *Electric Power Systems Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107627>
- Guo, D., Lathi, D., Harid, N., Griffiths, H., Haddad, A., y Ainsley, A. (2010). Experimental investigation into the performance of large-scale earthing electrodes. *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2010*, 465–468. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2010.5640727>
- Guo, Z., Chen, J., Chen, S., Yan, X., Du, S., Zhang, Y., y Lyu, W. (2021). A study on the response characteristics of adjacent grounding grids under artificially triggered lightning strokes. *Electric Power Systems Research*, 197(41), 107304. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107304>
- Hinostroza, I. C. N. (1999). Influencia del estiércol en el establecimiento de pasturas. *Instituto Nacional de Innovación Agraria*, 1–9.
- Hosseini, S. A., Mirzaie, M., y Barforoshi, T. (2015). Impact of surge arrester number and placement on reliability and lightning overvoltage level in high voltage substations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 65, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.037>
- Hu, H., Fang, M., Hu, F., Zeng, S., y Deng, X. (2021). A new design of substation

- grounding based on electrolytic cathodic protection and on transfer corrosion current. *Electric Power Systems Research*, 195(November 2019), 107174. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107174>
- Hu, W., Yu, S., Cheng, R., y He, J. (2012). A testing research on the effect of conductive backfill on reducing grounding resistance under lightning. *2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344300>
- Hu, Z., Han, Y., Yang, P., Wang, C., y Zalhaf, A. S. (2022). Evaluation of lightning overvoltage at neutral point of HVDC converter transformer based on EMTP. *Energy Reports*, 8, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.194>
- IEEE-Std-80<sup>TM</sup>-2000. (2000). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard (80-2000). *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 56(February).
- IEEE-Std-81<sup>TM</sup>-2012. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance , and Earth Surface Potentials of a Grounding System* (I. P. and E. Society (ed.); 1°). IEEE.
- IEEE Std 80<sup>TM</sup>-2013. (2015). Guide for Safety In AC Substation Grounding. In *Group* (Vol. 2000, Issue February).
- Islam, T., y Chik, Z. (2013). Improved near surface soil characterizations using a multilayer soil resistivity model. *Geoderma*, 209–210, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.015>
- Joffe, E., y Lock, K. (2023). GROUNDS FOR GROUNDING A Circuit-to-System Handbook. In *Grounds for Grounding*. <https://doi.org/10.1002/9781119770961.ch3>
- Khan, Y., Pazheri, F. R., Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., y Qureshi, M. I. (2012). Novel approach of estimating grounding pit optimum dimensions in high resistivity soils. *Electric Power Systems Research*, 92, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.06.003>
- Kontargyri, V. T., Gonos, I. F., y Stathopoulos, I. A. (2015). *Study on wind farm grounding*

*system*. 9994(c). <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2418315>

- Li, J., Li, Y., Wang, Y., y Song, J. (2021). Single-phase-to-ground fault protection based on zero-sequence current ratio coefficient for low-resistance grounding distribution network. *Global Energy Interconnection*, 4(6), 564–575. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.01.001>
- Lim, S. Y., Kim, K. H., Rhee, S. B., Kim, S. B., y Lee, K. Y. (2015). Transient State Analysis of Lightning Surge on Distribution Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30), 132–136. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.366>
- Lima, A. B., Caetano, C. E. F., Paulino, J. O. S., Boaventura, W. C., Lopes, I. J. S., y Barbosa, C. F. (2019). An original setup to measure grounding resistances using fast impulse currents and very short leads. *Electric Power Systems Research*, 173(February), 6–12. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.04.002>
- Liu, Y., Theethayi, N., Thottappillil, R., Gonzalez, R. M., y Zitnik, M. (2004). An improved model for soil ionization around grounding system and its application to stratified soil. *Journal of Electrostatics*, 60(2–4), 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.01.012>
- Luiz, V., Piantini, A., Almaguer, H. A. D., Coelho, R. A., Boaventura, C., Osvaldo, J., y Paulino, S. (2015). The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 118, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.027>
- Malcolm, N., y Aggarwal, R. K. (2015). The impact of multiple lightning strokes on the energy absorbed by MOV surge arresters in wind farms during direct lightning strikes. *Renewable Energy*, 83, 1305–1314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.010>
- Mansoor, V. M., Nagaveni, P., Amudha, A., Divyapriya, S., Emayavaramban, G., Ramkumar, M. S., y Krishnan, M. S. (2020). Throwing light on lightning. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 2572–2577. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.500>
- Mohamad Nor, N., Abdullah, S., Rajab, R., y Ramar, K. (2013). Field tests: Performances of practical earthing systems under lightning impulses. *International Journal of*

- Electrical Power and Energy Systems*, 45(1), 223–228.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.077>
- Mombello, E., Trad, O., Rivera, J., y Andreoni, A. (1996). Two-layer soil model for power station grounding system calculation considering multilayer soil stratification. *Electric Power Systems Research*, 37(1), 67–78.  
[https://doi.org/10.1016/0378-7796\(96\)01042-5](https://doi.org/10.1016/0378-7796(96)01042-5)
- Montanyà, J., López, J. A., van der Velde, O., Solà, G., Romero, D., Morales, C., Visacro, S., Saba, M. M. F., Goodman, S. J., Williams, E., Peterson, M., Pineda, N., Arcanjo, M., y Aranguren, D. (2022). Potential use of space-based lightning detection in electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 213(September). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108730>
- Sabiha, N. A., Alsharif, M., Taha, I. B. M., Elattar, E. E., Metwaly, M. K., y Abd-Elhady, A. M. (2021). Assessment of grounding grid for enhancing wind turbine service sustainability. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 577–589.  
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.005>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., y Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., y Baptista, L. M. del P. (2010). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (S. A. D. C. . McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Quinta edi). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Sekioka, S., Sonoda, T., y Ametani, A. (2005). Experimental study of current-dependent grounding resistance of rod electrode. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2 II), 1569–1576. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838660>
- Šesnić, S., Lalléchère, S., Poljak, D., Šušnjara, A., y Drissi, K. E. K. (2021). Sensitivity analysis of the direct time domain analytical solution for transient impedance of the horizontal grounding electrode using ANOVA approach. *Electric Power Systems Research*, 190(July 2020), 106861.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106861>

- Snodgrass, J., y Xie, L. (2020). Overvoltage analysis and protection of lightning arresters in distribution systems with distributed generation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 123(May), 106209. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106209>
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., y Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.012>
- Syafiqah Mohd Azmi, N., Mohamed, D., y Yuhyi Mohd Tadza, M. (2021). Effects of various relative humidity conditions on copper corrosion behavior in bentonite. *Materials Today: Proceedings*, 48(xxxx), 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.319>
- Taha, M. A., Li, L., y Wang, P. (2020). Estimation performance of the lightning protection system in an urban 110 kV grounding grid substation. *Results in Engineering*, 6(May), 100140. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100140>
- Trifunovic, J., y Kostic, M. (2016). Quick calculation of the grounding resistance of a typical 110 kV transmission line tower grounding system. *Electric Power Systems Research*, 131, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.014>
- Womble, M., Schreeg, M. E., Hoch, A., de Souza Meira, E. B., Foster, D., Premanandan, C., y Negrão Watanabe, T. T. (2021). Concurrent Clostridial Enteritis and Oviductal Adenocarcinoma with Carcinomatosis in an Adult Alpaca (*Vicugna pacos*). *Journal of Comparative Pathology*, 189, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jcpa.2021.09.007>
- Wu, J., He, J., Zhang, B., y Zeng, R. (2016). Influence of grounding impedance model on lightning protection analysis of transmission system. *Electric Power Systems Research*, 139, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.11.022>
- Wu, J., Zhang, B., He, J., y Zeng, R. (2014). Optimal design of tower footing device with combined vertical and horizontal grounding electrodes under lightning. *Electric Power Systems Research*, 113, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.03.021>
- Zalhaf, A. S., Han, Y., Yang, P., Wang, C., y Khan, M. A. (2022). Analysis of lightning



transient performance of 132 kV transmission line connected to Miramar wind farm: A case study. *Energy Reports*, 8, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.11.088>

Zhang, J., Xu, L., y Zhao, Q. (2017). Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers: Computational model and case study. *Construction and Building Materials*, 145, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.223>

Zhang, Z., Mei, D., Dan, Y., Zou, J., Liu, G., y Gao, C. (2020). Novel method for diagnosing corrosion of grounding electrodes in soil. *Electric Power Systems Research*, 178(September 2019), 106049. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106049>

Zhiwei, L. U., y Zhao, Z. (2012). *The Grounding Impedance Calculation of Large Steel Grounding Grid*. 17, 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2012.02.077>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de consistencia

Planteamiento del problema	Planteamiento del problema específico	Hipótesis	Objetivos	VARIABLES	Indicadores	Métodos
¿Cómo mejora el tratamiento de los pozos de puesta a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos domésticos?	¿Cómo influye la resistividad del terreno en la resistividad del pozo a tierra?	La resistividad del terreno influye en la resistividad del pozo a tierra.	Establecer la resistividad eléctrica del terreno para el cálculo de la resistividad del pozo a tierra.	<b>Independiente:</b> Composición de los estratos del suelo donde se ubica el electrodo. <b>Dependiente:</b> Resistividad del terreno	Ohmios/metro ( $\Omega$ -m)	Método de Wenner
	¿Cómo mejora la resistividad del pozo a tierra, con el estiércol de camélidos sudamericanos domésticos?	La resistividad del pozo a tierra, mejora con el estiércol de camélidos sudamericanos domésticos.	Determinar la resistividad del pozo a tierra con el tratado estiércol de camélidos sudamericanos domésticos.	<b>Independiente:</b> Método de mejoramiento del sistema a tierra con estiércol de camélidos sudamericanos. <b>Dependiente:</b> Mejoramiento de la resistividad del pozo.	Ohmios ( $\Omega$ ).	Caída del potencial

## Anexo 2. Certificado de calibración



# Certificado de Calibración

CALIBRATION CERTIFICATE

Laboratorio Electricidad Código N° E911-1659A-2023-1  
Laboratory Electricity Code N°

ISO / IEC 17025

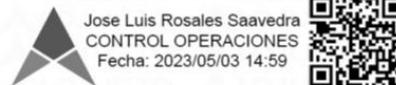
Estos resultados están relacionados únicamente con el ítem descrito en este certificado. [These results are only related to the item described in this certificate.]

Es responsabilidad del cliente establecer la frecuencia de calibración de su instrumento, de acuerdo a sus propios usos y exigencias. [It is the customer's responsibility to establish the calibration frequency of their instrument, according to their own uses and requirements.]

LO JUSTO SAC, no se hace responsable por los perjuicios que pueda ocasionar el uso incorrecto o inadecuado del instrumento aquí o de este documento. [LO JUSTO S.A.C. is not responsible for any damage that may be caused by the incorrect or inappropriate use of the instrument described here or of this document.]

Este certificado se emite de manera electrónica. Si existe alguna duda, en la veracidad del presente certificado podrá consultarlo directamente a través de su dispositivo electrónico con el código QR. También puede consultar en el E-mail [lojusto@lojusto.com](mailto:lojusto@lojusto.com). This certificate is issued electronically. If there is any doubt, the veracity of this certificate can be consulted directly through your electronic device with the QR code. You can also consult in the E-mail [lojusto@lojusto.com](mailto:lojusto@lojusto.com)

- a. Solicitante:** *Applicant* **ENOC EDISON JILAJA CARITA**
- b. Dirección solicitante:** *Applicant address* **Urbanización chanu chanu segunda etapa mz. B6 - L9**
- c. Instrumento de medida:** *Measuring instrument* **TELURÓMETRO (Función resistencia eléctrica) Medición**
- d. Marca:** *Manufacturer / Brand* **MEGABRAS**
- e. Modelo:** *Model:* **MTD20KWe**
- f. Número de serie:** *Serial Number:* **21E1317**
- g. Identificación:** *Internal code* **No indica**
- h. Lugar de calibración:** *Calibration Place* **Laboratorio de Electricidad, de LO JUSTO S.A.C.**
- i. Fecha de calibración:** *Calibration Date* **2023-05-02**
- j. Supervisor de Laboratorio:** *Laboratory Supervisor* **Vílca Cayllahua, Giancarlo Ernesto  
Supervisor de Laboratorio  
Laboratory Supervisor**
- k. Signatario autorizado:** *Authorized signatory*



Jose Luis Rosales Saavedra  
CONTROL OPERACIONES  
Fecha: 2023/05/03 14:59



Este certificado de calibración sólo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización de la Dirección de LO JUSTO S.A.C. Certificados sin firma digital carecen de validez.

FT00-INRE-Edición digital 00



Laboratorio Electricidad Código N° E911-1659A-2023-1  
 Laboratory Electricity Code N° E911-1659A-2023-1

**1 Información del instrumento**

*Instrument Information*

**Rango del instrumento** : 20 Ω; 200 Ω; 2000 Ω; 20 kΩ  
 Rango no Automatico

**Resolución:** : 0,01 Ω; 0,1 Ω; 1 Ω; 0,01 kΩ

**Cables de medición** : 04 cables del instrumento .  
 El instrumento no tiene conexión de tierra.

El valor medido de la batería 13 V.

**Etiqueta de Calibración** : 106149

**Código Lo Justo** : LJ-4999

El tiempo de encendido del instrumento antes de la calibración fue mayor a 30 minutos.  
 El instrumento ingresa al laboratorio con fecha 2023-4-27.

**2 Trazabilidad :**

*Traceability :*

Tabla 1

*Patrones*

Patrón	Codigo QR de certificado
--------	--------------------------

Décadas de Resistencia IET Labs, Inc, con certificado de calibración 20220812-80096.



**3 Instrumentos auxiliares :**

*Instruments auxiliary :*

- Medidor de Condiciones Ambientales de temperatura y Humedad en Aire marca ETI Ltd., con certificado de calibración EPI-2022-162-1.

**4 Procedimiento de calibración:**

*Calibration procedure:*

- EURAMET cg-15 "Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters" Version 3.0 Febrero 2015.

**5 Condiciones Ambientales**

*Environmental conditions*

- Temperatura Ambiente promedio : 22,2 °C ± 0,3 °C  
 - Humedad Relativa promedio : 45,3 %HR ± 1,1 %HR

ISO / IEC 17025



Laboratorio Electricidad  
Laboratory Electricity

Código N° E911-1659A-2023-1  
Code N°

## 6 Resultados de Calibración

Results of Calibration

Tabla 1

Medición de resistencia eléctrica a 3 Hilos

Rango de Medición	Valor Resistencia Aplicado	Lectura del Instrumento	Error a aplicar	Factor de Cobertura	Incertidumbre de medida
20 Ω	0,0000 Ω	0,00 Ω	0,0000 Ω	2,01	0,0082 Ω
20 Ω	2,0041 Ω	2,00 Ω	-0,0041 Ω	2,01	0,0086 Ω
20 Ω	10,0044 Ω	10,00 Ω	-0,0044 Ω	2,00	0,0089 Ω
20 Ω	18,0082 Ω	17,95 Ω	-0,0582 Ω	2,00	0,0095 Ω
200 Ω	20,005 Ω	20,0 Ω	-0,005 Ω	2,01	0,083 Ω
200 Ω	100,004 Ω	100,1 Ω	0,096 Ω	2,01	0,084 Ω
200 Ω	180,012 Ω	179,6 Ω	-0,412 Ω	2,01	0,084 Ω
2000 Ω	200,01 Ω	200 Ω	-0,01 Ω	2,01	0,82 Ω
2000 Ω	999,99 Ω	1 001 Ω	1,01 Ω	2,01	0,83 Ω
2000 Ω	1 799,98 Ω	1 815 Ω	15,02 Ω	2,01	0,84 Ω
20 kΩ	1,9999 kΩ	2,07 kΩ	0,0701 kΩ	2,01	0,0082 kΩ
20 kΩ	10,0004 kΩ	10,04 kΩ	0,0396 kΩ	2,01	0,0083 kΩ
20 kΩ	17,9999 kΩ	17,33 kΩ	-0,6699 kΩ	2,01	0,0084 kΩ

La resistencia de los cables indicada en el instrumento fue de 0,08 Ω; 0,1 Ω; 0 Ω; 0,00 kΩ

Tabla 2

Medición de resistencia eléctrica a 4 Hilos

Rango de Medición	Valor Resistencia Aplicado	Lectura del Instrumento	Error a aplicar	Factor de Cobertura	Incertidumbre de medida
20 Ω	0,0000 Ω	0,00 Ω	0,0000 Ω	2,01	0,0082 Ω
20 Ω	2,0041 Ω	1,99 Ω	-0,0141 Ω	2,01	0,0086 Ω
20 Ω	10,0044 Ω	9,99 Ω	-0,0144 Ω	2,00	0,0089 Ω
20 Ω	18,0082 Ω	17,96 Ω	-0,0482 Ω	2,00	0,0095 Ω
200 Ω	20,005 Ω	20,0 Ω	-0,005 Ω	2,01	0,083 Ω
200 Ω	100,004 Ω	100,0 Ω	-0,004 Ω	2,01	0,084 Ω
200 Ω	180,012 Ω	179,9 Ω	-0,112 Ω	2,01	0,084 Ω
2000 Ω	200,01 Ω	198 Ω	-2,01 Ω	2,01	0,82 Ω
2000 Ω	999,99 Ω	996 Ω	-3,99 Ω	2,01	0,83 Ω
2000 Ω	1 799,98 Ω	1 812 Ω	12,02 Ω	2,01	0,84 Ω
20 kΩ	1,9999 kΩ	2,07 kΩ	0,0701 kΩ	2,01	0,0082 kΩ
20 kΩ	10,0004 kΩ	10,04 kΩ	0,0396 kΩ	2,01	0,0083 kΩ
20 kΩ	17,9999 kΩ	17,39 kΩ	-0,6099 kΩ	2,01	0,0084 kΩ

La resistencia de los cables indicada en el instrumento fue de 0,01 Ω; 0,0 Ω; 0 Ω; 0,00 kΩ

ISO / IEC 17025



Laboratorio Electricidad  
Laboratory Electricity

Código N° E911-1659A-2023-1  
Code N°

### 7 Notas y aclaraciones:

*Notes and clarifications:*

La incertidumbre expandida de medición reportada en el presente certificado de calibración resulta de multiplicar la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura  $k$ , de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de medida" JCGM:100 2008 BIPM.

La incertidumbre expandida de medición fue calculada a partir de los componentes de incertidumbre de los factores de influencia en la calibración. La incertidumbre estimada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.

*The expanded measurement uncertainty reported in this calibration certificate results from multiplying the combined standard uncertainty by the coverage factor  $k$ , so that the coverage probability corresponds approximately to a 95% confidence level. The uncertainty was determined according to the "Guide for the Expression of Measurement Uncertainty" JCGM:100 2008 BIPM.*

*The expanded measurement uncertainty was calculated from the uncertainty components of the influencing factors in the calibration. The estimated uncertainty does not include an estimate of long-term variations.*

Se ha colocado etiquetas de color blanco brillante N°: 106149 con logotipo de LO JUSTO S.A.C. en señal de haber realizado la calibración.

*Bright white labels have been placed: N° 106149 with the logo of LO JUSTO S.A.C. as a sign of having carried out the calibration.*

Este Certificado de calibración cumple con los requisitos establecidos en la Norma ISO/IEC 17025: Requisitos Generales para la competencia de los Laboratorios de Calibración y Ensayo.

*This calibration certificate complies with the requirements of ISO / IEC 17025: General requirements for the competence of Calibration and Testing Laboratories.*

### 8 Observaciones y comentarios:

*Observations and comments*

Sin observaciones, ni comentarios.

EL-408-2023 // JGO GVC

\*\*\* FIN DEL DOCUMENTO \*\*\*

ISO / IEC 17025

### Anexo 3. Panel Fotográfico

#### Medición de la resistividad



### Toma de datos



Depósito de estiércol de camélidos sudamericanos



### Recolección del estiércol



### Tratamiento del pozo a tierra



### Medición de la resistencia



### Equipo de apoyo





## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO,  
identificado con DNI 40485179 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIA TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE.

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS  
DOMÉSTICOS EN EL TRATAMIENTO DE LOS POZOS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS  
ALTOANDINAS”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 10 de MAYO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MARCOS JOSE VILLANUEVA CORNEJO,  
identificado con DNI 40485179 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIA TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE.

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS  
DOMÉSTICOS EN EL TRATAMIENTO DE LOS POZOS DE PUESTA A TIERRA EN ZONAS  
ALTOANDINAS”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia: Creative

Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 10 de MAYO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella