

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**“VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES  
EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO A TIERRA VERTICAL”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO EN ENERGÍA**

**AUTOR:**

Bach. JIANCARLOS JOSE VIVAR VALDIVIA  
Bach. EDSGAR LUIS CACERES VELASQUEZ

**ASESOR:**

M.Sc. JULIO HIPÓLITO NÉSTOR ESCATE RAVELLO

**NUEVO CHIMBOTE – PERÚ**  
**2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



**HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR**

El presente proyecto de investigación de tesis titulado “**VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO A TIERRA VERTICAL**”

Elaborado por:

- Bach. Jiancarlos José Vivar Valdivia
- Bach. Edsgar Luis Cáceres Velásquez

Para optar el título profesional de ingeniero en energía, ha contado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.

---

M.Sc. Julio Hipólito Néstor Escate Ravello





Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad

## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veinte días del mes de junio del año dos mil diecinueve, siendo las once horas de la mañana, se instaló en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 096-2019-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. JOSE LUIS CASTILLO VENTURA : PRESIDENTE
- Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES : SECRETARIO
- M.Sc. JULIO HIPÓLITO NÉSTOR ESCATE RAVELLO : INTEGRANTE
- M.Sc. CESAR LUIS LOPEZ AGUILAR : ACCESITARIO

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "VARIACION DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCION DE UN POZO A TIERRA VERTICAL", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía: JIANCARLOS JOSE VIVAR VALDIVIA con código de matrícula 0200911001, teniendo como asesor al docente M.Sc. JULIO HIPÓLITO NÉSTOR ESCATE RAVELLO.

Terminada la sustentación, el bachiller respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, el contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
JIANCARLOS JOSE VIVAR VALDIVIA	16	Buena

Siendo las doce horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.

  
Mg. José L. Castillo Ventura  
PRESIDENTE

  
Mg. Amancio R. Rojas Flores  
SECRETARIO

  
M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello  
INTEGRANTE



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**Dirección E.P. de Ingeniería en Energía**

Teléfono: 310445 - Anexo 1035

Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad

## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los veinte días del mes de junio del año dos mil diecinueve, siendo las once horas de la mañana, se instaló en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N° 096-2019-UNS-CFI, integrado por los siguientes docentes:

- Mg. JOSE LUIS CASTILLO VENTURA : PRESIDENTE
- Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES : SECRETARIO
- M.Sc. JULIO HIPÓLITO NÉSTOR ESCATE RAVELLO : INTEGRANTE
- M.Sc. CESAR LUIS LOPEZ AGUILAR : ACCESITARIO

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "VARIACION DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCION DE UN POZO A TIERRA VERTICAL", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía: ED SGAR LUIS CACERES VELASQUEZ con código de matrícula 0201011031, teniendo como asesor al docente M.Sc. JULIO HIPÓLITO NÉSTOR ESCATE RAVELLO.

Terminada la sustentación, el bachiller respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, el contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Titulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
EDSGAR LUIS CACERES VELASQUEZ	16	Bueno

Siendo las doce horas del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.

  
Mg. José L. Castillo Ventura  
PRESIDENTE

  
Mg. Amancio R. Rojas Flores  
SECRETARIO

  
M.Sc. Julio H. N. Escate Ravello  
INTEGRANTE

## DEDICATORIA

Les dedico este trabajo a Dios y a mis padres Julia María y Wilfredo José, que siempre estuvieron presentes en mi formación académica, apoyándome en todo momento.

Quiero expresar mi agradecimiento a mi amigo y colega ing. Javier Alexis Portilla por su aporte al desarrollo de este proyecto.

A mis profesores, gracias por su tiempo y enseñanzas en mi formación profesional, en especial al Ing. Julio Escate Ravello. Por haberme guiado en el todo el desarrollo de este trabajo.

Bachiller: Jiancarlos José Vivar Valdivia

Le agradezco a Dios en primer lugar por haberme dado las fuerzas para seguir adelante en todo este trayecto, A mis padres y hermanos que siempre han estado presentes en mi formación académica dándome su apoyo.

Agradezco a mis amigos y las personas que con su apoyo me dieron el aliento para seguir adelante, A mis profesores por los conocimientos transmitidos, en Especial al Ing. Julio Escate Ravello por habernos guiado durante el desarrollo de esta tesis.

Bachiller: Edsgar Luis Cáceres Velásquez

## RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo analizar la variación de la resistencia en función a los materiales empleados para la construcción de un pozo a tierra vertical.

Para lo cual se utilizó la siguiente metodología:

Se analizó la variación de la resistencia en función de la longitud del electrodo en la cual se varió la longitud del electrodo, la variación de la resistencia en función al diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo, la variación de la resistencia en función a la cantidad de bentonita, la variación de la resistencia en función a la cantidad de sal industrial y el uso de las proporciones más óptimas de los materiales en la construcción de un pozo a tierra vertical.

Teniendo como resultado que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta las cantidades de sal industrial, bentonita, cemento conductor y longitud del electrodo.

Por lo tanto se concluye que al unir las proporciones óptimas en un pozo a tierra vertical nos da un valor de la resistencia de 1.598% (0.01598) del valor numérico de la resistividad cuando la longitud óptima de un electrodo para un pozo a tierra es 2.4 m, el diámetro del cilindro óptimo formado por el cemento alrededor del electrodo es 4" (0.1016 m), la cantidad óptima de bentonita es 120 Kg /3 m<sup>3</sup> y la cantidad óptima de sal industrial es 120 Kg /3 m<sup>3</sup>.

**PALABRAS CLAVES:** Pozo a tierra, resistencia, resistividad.

## ABSTRACT

The objective of this project was to analyze the variation of the resistance according to the materials used for the construction of a well to vertical ground.

For which the following methodology was used:

We analyzed the variation of the working resistance of the electrode length in which the electrode length was varied, the variation of the resistance as a function of the diameter of the cylinder formed by the conductive cement around the electrode, the variation of the resistance in function to the amount of bentonite, the variation of the resistance in function to the amount of industrial salt and the use of the most optimal proportions of the materials in the construction of a well to vertical ground.

As a result, the resistance of a well to ground decreases as the amounts of industrial salt, bentonite, conductive cement and electrode length increase.

It is therefore concluded that by joining the optimal proportions in a well to vertical ground gives us a resistance value of 1.598% (0.01598) of the numerical value of the resistivity when the optimum length of an electrode for a well to ground is 2.4 m, the optimum cylinder diameter formed by the cement around the electrode is 4 "(0.1016 m), the optimum amount of bentonite is 120 Kg /3 m<sup>3</sup> and the optimum amount of industrial salt is 120 Kg /3 m<sup>3</sup>.

**KEYWORDS:** Well to earth, resistance, resistivity.

# ÍNDICE

## **CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN**

1.1 Antecedentes de la investigación .....	2
1.2 Formulación del problema .....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Formulación de la hipótesis .....	3
1.5 Justificación .....	4
1.6 Limitaciones del trabajo .....	4

## **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

2.1 Sistema de puesta a tierra.....	6
2.1.1 Finalidad de los sistemas de puesta a tierra .....	7
2.1.2 Donde se requieren los sistemas de puesta a tierra .....	7
2.1.3 Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra vertical.....	8
2.1.3.1 Características técnicas de los materiales.....	8
2.1.4 Tipos de puesta a tierra .....	11
2.1.4.1 Puesta a tierra vertical .....	11
2.1.4.2 Puesta a tierra horizontal.....	12
2.1.4.3 Malla de puesta a tierra.....	12
2.2 Resistencia a tierra.....	12
2.2.1 Valores de resistencia para puesta a tierra. ....	14
2.2.2 Resistividad del suelo. ....	15
2.2.3 Elementos que influyen en la resistividad del terreno. ....	16
2.2.3.1 Naturaleza del terreno. ....	16
2.2.3.2 Humedad.....	18
2.2.3.3 Temperatura del terreno .....	19
2.2.3.4 Salinidad del terreno.....	20
2.2.3.5 Estratigrafía del terreno.....	21
2.2.3.6 Variaciones estacionales .....	22
2.2.3.7 Factores de naturaleza eléctrica.....	23
2.2.3.8 Compactación del terreno alrededor de los electrodos .....	23

2.3 Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica .....	24
2.3.1 El aumento de longitud de los electrodos .....	24
2.3.2 Incremento del radio de los electrodos .....	26
2.3.3 Cambio de terreno por uno de menor ohmiaje .....	27
2.3.4 Tratamiento químico del suelo.....	28
2.3.4.1 Cloruro de sodio (Sal).....	29
2.3.4.2 Bentonita .....	29
2.3.4.3 Cemento conductorio .....	30
2.4 Medida de resistividad del terreno.....	31
2.4.1 Método de werner.....	31
2.4.2 Utilidad de la medida de resistividad .....	33
2.5 Medida de resistencia.....	33
2.5.1 Método de 62%.....	33
2.5.2 Utilidad de la medida de la resistencia .....	35
2.6 Normativa relacionada a sistemas de puesta a tierra.....	36
2.7 Materiales de un pozo a tierra vertical clásico.....	38
 <b>CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
3.1 Materiales .....	42
3.2. Procedimiento.....	42
3.2.1 Procedimiento para analizar la influencia del electrodo en la resistencia ...	42
3.2.2. Procedimiento para analizar la variación de la resistencia en función al diámetro del cilindro formado por el cemento conductorio alrededor del electrodo.....	43
3.2.3 Procedimiento para analizar la variación de la resistencia en función a la cantidad de la bentonita .....	44
3.2.4 Procedimiento para analizar la variación de la resistencia en función a la cantidad de la sal .....	47
3.3 Métodos .....	51
3.3.1 Método de werner.....	51
3.3.2 Método de 62%.....	53

## **CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Reducción de la resistencia cuando se incrementa la longitud del electrodo .....	56
4.2 Reducción de la resistencia añadiendo cemento conductor alrededor del electrodo .....	67
4.3 Reducción de la resistencia añadiendo bentonita al terreno .....	80
4.4 Reducción de la resistencia añadiendo sal industrial al terreno .....	92
4.5 Análisis hipotético cuando la longitud del electrodo, cemento conductor, bentonita, sal industrial, actúan sobre un mismo pozo a tierra vertical.....	102
4.5.1 Longitud del electrodo.....	103
4.5.2 Diámetro del cilindro formado por el cemento conductor (Dcc) alrededor del electrodo de 2.4 m de longitud.....	104
4.5.3 Bentonita.....	105
4.5.4 sal industrial.....	106
4.5.5 Cálculo de la resistencia final en función de los factores relacionados a bentonita, sal industrial, cemento conductor y longitud del electrodo.....	106
4.5.6 Valor de la resistencia optimizando la cantidad de bentonita, sal industrial, cemento conductor y longitud del electrodo.....	108
4.5.7 Resistividad de terrenos que después de ser sometidos a tratamiento tendrán una resistencia menor a $25 \Omega$ .....	109
4.6 Materiales de un pozo a tierra vertical óptimo.....	110

## **CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones .....	114
5.2 Recomendaciones .....	116

## **CAPÍTULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

6.1 Bibliografía.....	118
-----------------------	-----

## **CAPÍTULO VII ANEXOS**

7.1 Anexos.....	121
-----------------	-----

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

- Efraín, T. (2008). Publicó un trabajo de investigación titulada "Prácticas y uso de puestas a tierra en redes eléctricas de baja tensión; mejoramiento de las puestas a tierra-tratamiento mediante insumos químico". En el cual adjunta información sobre las técnicas y nuevos procedimientos referidas a las puestas a tierra para reducir la resistividad del suelo y para reducir la resistencia de los pozos a tierra.
- Nelson, M. (1999). Publicó un trabajo de investigación titulada "Sistema de puesta a tierra". En su investigación realizó un estudio del sistema de puesta a tierra, con el objetivo de reducir la resistividad del suelo, para lo cual utilizó los métodos adecuados para su diseño y además indica cómo se debe realizar los mantenimientos de los Sistemas de puesta a tierra. En esta investigación también analizó el comportamiento del electrodo de puesta a tierra en las instalaciones.
- Francisco, L. (2007). Publicó un trabajo de investigación titulada "Sistema de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas ". En el cual diseñaron un sistema de puesta a tierra haciendo los cálculos matemáticos de la resistividad de la tierra. En esta investigación se detalla los conceptos relacionados a los Sistemas de puesta a tierra, además de fundamentos del proceso de descarga atmosférica y sus sistemas de protección.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

- Cómo varía la resistencia en función a los materiales empleados para la construcción de un pozo a tierra vertical.

### **1.2 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar la variación de la resistencia en función a los materiales empleados para la construcción de un pozo a tierra vertical.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la variación de la resistencia en función a la longitud del electrodo en el pozo a tierra vertical.
- Determinar la variación de la resistencia en función al diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo del pozo a tierra vertical.
- Determinar la variación de la resistencia en función a la cantidad de la bentonita en el pozo a tierra vertical.
- Determinar la variación de la resistencia en función a la cantidad de sal industrial en el pozo a tierra vertical.

### **1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS**

- La resistencia se reducirá al aumentar la cantidad de materiales empleados (bentonita, sal industrial, cemento conductivo y electrodo), en la construcción de un pozo a tierra vertical.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN**

- La instalación de pozos a tierra es necesario y es parte importante de las instalaciones eléctricas para brindar seguridad a la integridad de las personas.
- Esta investigación demuestra cómo varía la resistencia en función a los materiales empleados (bentonita, sal industrial, cemento conductor y electrodo) en la construcción de un pozo a tierra vertical.
- La finalidad de esta investigación es obtener el mayor beneficio de los materiales empleados, en la construcción de un pozo a tierra.

## **1.6 LIMITACIONES DEL TRABAJO**

De lo mencionado anteriormente cabe resaltar las limitaciones en este proyecto:

- Esta investigación se hará únicamente en el AAHH María Idelsa C.28, Garatea – Nuevo Chimbote, la cual tiene su tipo de suelo llamado “arena sílica”.
- La posición del electrodo será en el pozo de puesta a tierra será únicamente en posición vertical.

# **CAPÍTULO II**

## **MARCO TEÓRICO**

## 2.1 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas de pozo a tierra, se están volviendo un tema común en la sociedad, ya que existen diferentes instalaciones eléctricas en distintos ámbitos, los cuales pueden generar un peligro de descarga eléctrica, y para ello se debe tener un sistema de protección ante descargas.

Los sistemas de puesta a tierra son elementos muy importantes en los sistemas eléctricos, porque además de permitir de forma segura la conducción hacia el suelo de cargas eléctricas originadas por rayos, anomalías del sistema o electricidad estática, poseen la capacidad de dispersión y disipación de fallas, sin la presencia en la superficie de potenciales peligrosos.

Al presentarse una falla a tierra o una descarga atmosférica proporciona un camino seguro para la corriente eléctrica de falla y del rayo, cumpliendo el objetivo fundamental de los sistemas de puesta a tierra que es la seguridad de las personas.

Según el Reglamento Técnico de las Instalaciones Eléctricas toda instalación eléctrica que esté citada en este, debe contar con un sistema de puesta a tierra, que asegure que cualquier punto exterior o interior por donde puedan estar o transitar personas sea considerado seguro desde el punto de vista del sometimiento de estas a tensiones de paso, de contacto o transferidas; esto por el hecho de que no se deben superar los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla. (“Guía de medición de tierra”, 2015)

### **2.1.1 FINALIDAD DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

- (a) Proteger y cuidar la vida e integridad física de las personas ante consecuencias que puede ocasionar una descarga eléctrica, y evitar daños a la propiedad, enlazando a tierra las partes metálicas normalmente energizadas de las instalaciones, equipos, artefactos, etc.
- (b) Limitar las tensiones en los circuitos cuando queden expuestos a tensiones superiores a las que han sido diseñados.
- (c) En general, para limitar la tensión de fase a tierra a 250 V, o menos, en aquellos circuitos de corriente alterna que alimentan a sistemas de alambrado interior
- (d) Limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas en aquellos circuitos que están expuestos a estos fenómenos.
- (e) Facilitar la operación de equipos y sistemas eléctricos. (CNE – Utilización, 2006)

### **2.1.2 DONDE SE REQUIEREN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA**

En la práctica actual de ingeniería se requieren conexiones de puesta a tierra en:

- Aparatos eléctricos en fábricas y residencias.
- Pararrayos.
- Torres de líneas de transmisión y de comunicaciones.
- Sitio de cargue y descargue de combustibles.
- Maquinas que generan electricidad estática.
- Áreas de atención crítica en hospitales.
- Herramientas eléctricas portátiles.
- Trabajos en líneas energizadas.
- Otros

### **2.1.3 MATERIALES QUE CONSTITUYEN EL POZO DE PUESTA A TIERRA VERTICAL**

Los materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra son los siguientes:

- Electrodo
- Material circundante al electrodo de puesta a tierra
- Elementos químicos utilizados para reducir el valor de la resistencia de puesta a tierra
- Conectores entre el electrodo y el conductor de puesta a tierra, este último une al electrodo al borne de puesta a tierra en el tablero o en el panel general.
- Protección externa del pozo. (NTP 370.052)

#### **2.1.3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES**

##### **A. ELECTRODO**

Según el Código Nacional de Electricidad (suministro 2011) y Código Nacional de Electricidad – Utilización, debe tener las siguientes características:

- Los electrodos de puesta a tierra pueden ser seccionables, su longitud total no será inferior a 2.40 m, con diámetro no inferior a 16 mm (o 5/8 pulgada) para electrodos de acero-cobre y 13 mm (o ½ pulgada) para electrodos de cobre.

Se puede utilizar electrodos más largos o electrodos múltiples para reducir la resistencia de puesta a tierra. La separación entre electrodos múltiples no debe ser inferior a 2,00 m o la longitud de la varilla.

La profundidad de penetración no será menor a 2.40 m. El extremo superior cuando sea introducido debajo del nivel del suelo, deberá tener la protección adecuada contra los agentes corrosivos del terreno.

## **B. MATERIAL CIRCUNDANTE AL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA**

Debe estar constituido de tierra cernida o material de baja resistividad. Debiendo evitarse terrenos agrícolas.

En lo posible debe emplearse el mismo material del terreno donde se ubica el pozo a tierra, eliminando los elementos pesados y de alta resistividad, tales como piedras y elementos extraños e impurezas. (NTP 370.052)

## **C. ELEMENTOS QUÍMICOS UTILIZADOS PARA REDUCIR EL VALOR DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

Se emplea para modificar el medio que rodea el electrodo y conseguir los siguientes efectos:

- Mejorar la conductividad eléctrica de la tierra.
- Conseguir una excelente calidad higroscópica para una buena absorción de agua y por ende de permanente humedad.
- Ausencia de fenómenos corrosivos dañinos para los accesorios del pozo de puesta a tierra. (NTP 370.052)

## **D. CONECTORES ENTRE EL ELECTRODO Y EL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA**

Estos elementos permiten la conexión del electrodo de puesta a tierra con el conductor de puesta a tierra, este último se conecta al borne de puesta a tierra en el tablero o el panel principal.

La conexión debe considerar los siguientes aspectos:

1. Debe ser accesible.
2. Debe ser realizada de manera que asegure una permanente y efectiva puesta a tierra.

No se requiere que la conexión sea accesible, cuando se emplea electrodos de puesta a tierra del tipo embutido en concreto.

Los conectores son grapas empernadas fabricadas de cobre de temple duro o de bronce fundido, adecuado para proveer un ajuste seguro entre el conductor de puesta a tierra de cobre y el electrodo, el perno de ajuste debe ser del mismo material.

Debe tener capacidad para recibir como mínimo conductores de 10 mm<sup>2</sup>.  
Debe permitir solo un conductor por grapa, a menos que la grapa sea diseñada para instalar más de un conductor por separado. (NTP 370.052)

### E. PROTECCIÓN EXTERNA DEL POZO

Cuando la conexión al electrodo sea accesible se debe proveer una protección contra daños mecánicos externos, el material de esta protección puede ser cemento, fierro u otro material de características similares. Se recomienda adoptar una disposición como se recomienda en la figura 1. (NTP 370.052)

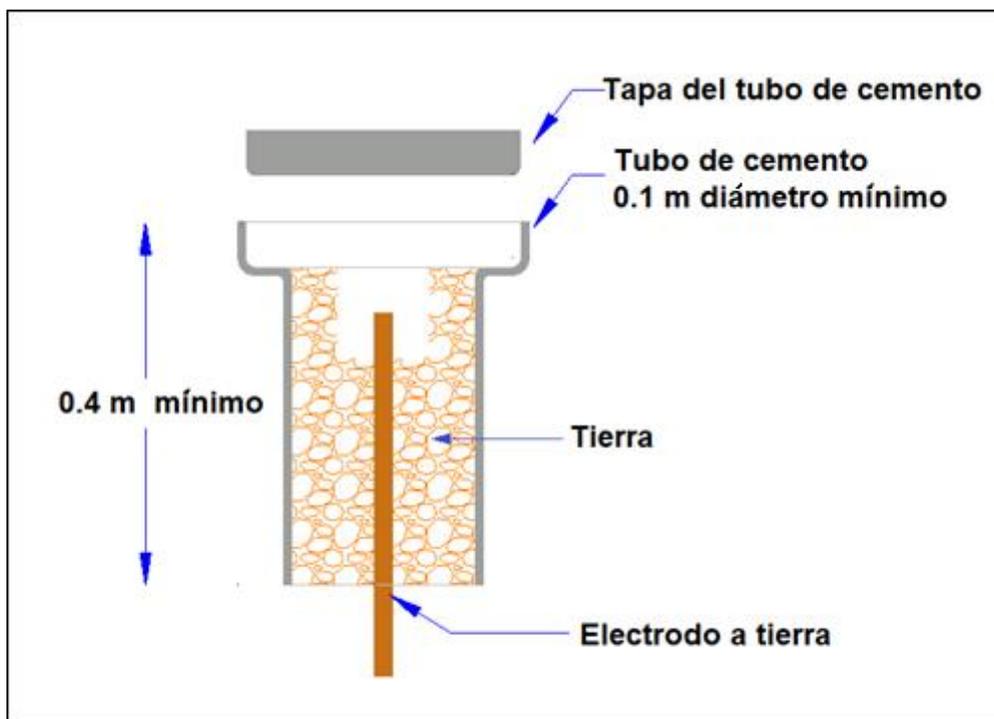


Figura 1.- Protección externa de pozo a tierra.

Fuente: NTP 370.052

## 2.1.4 TIPOS DE PUESTA A TIERRA

Consideración geométrica de la puesta a tierra.

### 2.1.4.1 PUESTA A TIERRA VERTICAL

- Se instala el electrodo en posición vertical.
- Es el más común porque su costo de instalación es más barato.
- Un tipo de bastante difundido es el cooperweld (acero con recubrimiento de cobre).

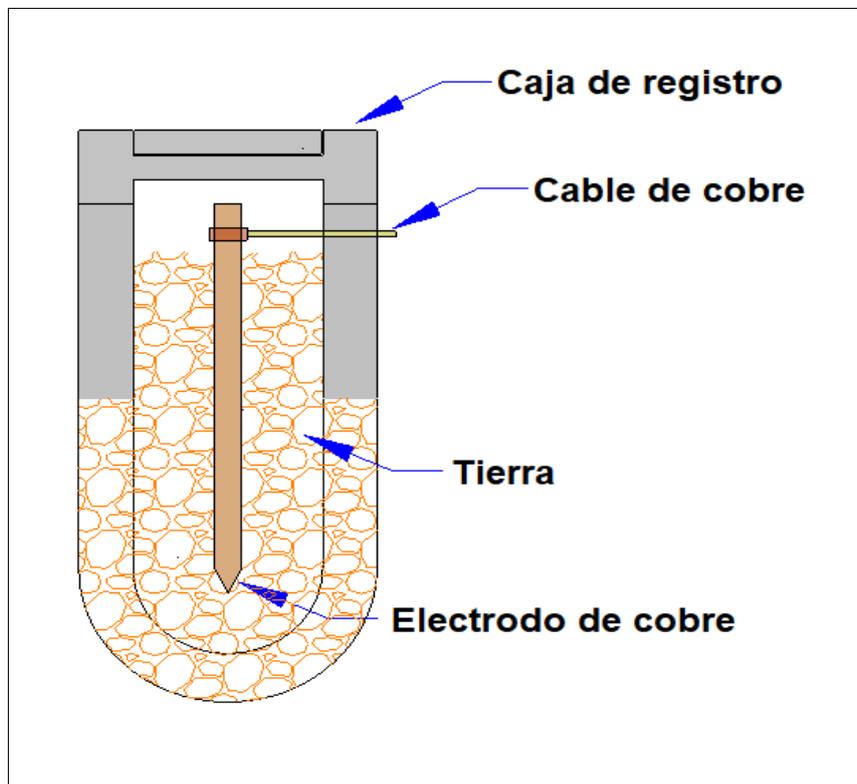


Figura 2.- Pozo a tierra vertical.

Fuente: autoría propia

#### 2.1.4.2 PUESTA A TIERRA HORIZONTAL

- Se instala el electrodo en posición horizontal.
- Se aplica generalmente cuando el subsuelo es rocoso.
- Se usa pletina de cobre que en el mercado se encuentra a partir de 3 metros.

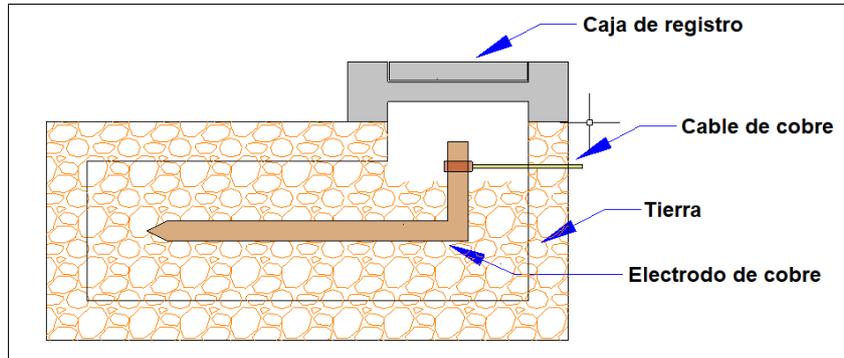


Figura 3.- Pozo a tierra horizontal.

Fuente: autoría propia

#### 2.1.4.3 MALLA DE PUESTA A TIERRA

- Es un reticulado normalmente formado por la unión de conductores de cobre dispuestos horizontalmente, configurados en forma perpendicular y uniformemente espaciados.
- En ciertos casos se incluye conductores verticales (barras) en los extremos.

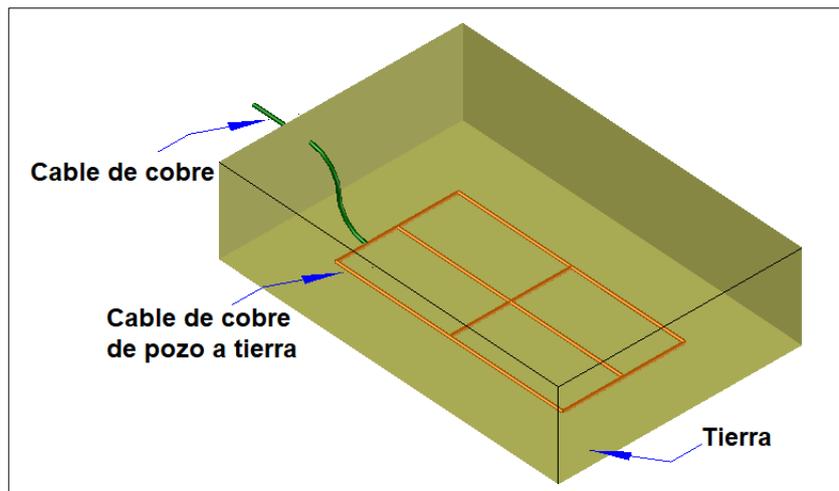


Figura 4.- Malla de puesta tierra

Fuente: autoría propia

## 2.2 RESISTENCIA A TIERRA

Es la resistencia del conductor o electrodo enterrado (redes de metal, cintas metálicas, chapa metálica, jabalinas tubulares, etc.), la del material que lo rodea y con el que está en contacto (tierra). Se compone de la resistencia de la superficie de electrodo (óxidos metálicos y metal puro) y la resistencia de la tierra (el material más común está compuesto por silicato de aluminio, arena y desechos orgánicos, en general. conductores) principalmente cerca de la superficie del electrodo y con enorme dependencia de la humedad contenida.

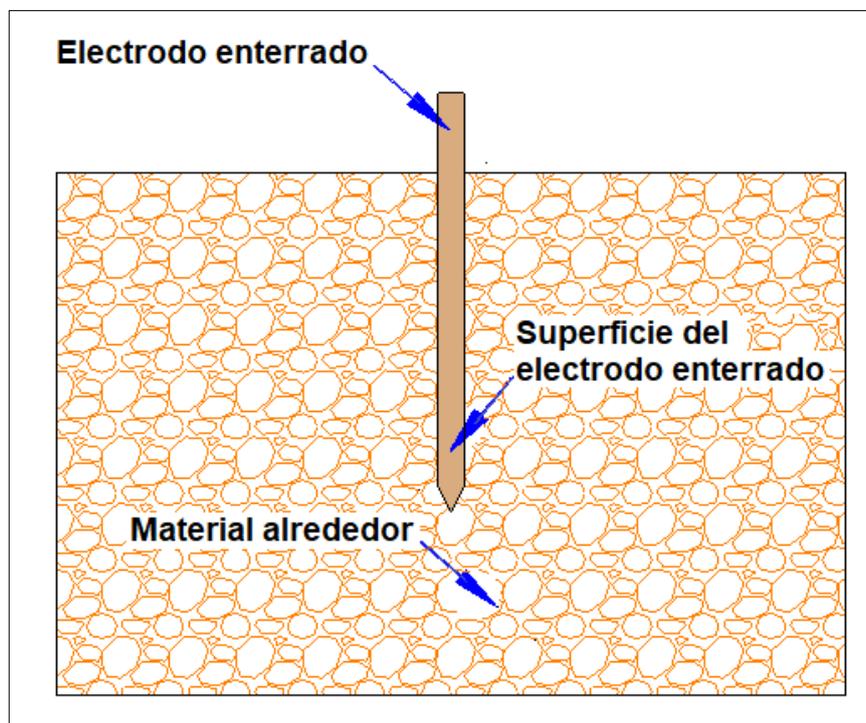


Figura 5.- Electrodo de puesta a tierra.

Fuente: autoría propia

La corriente de falla que atraviesa el electrodo de tierra en caso de fallas existentes en la instalación eléctrica o la carga conectada, causa una caída de tensión debida a la resistencia de la puesta a tierra. La distribución de tensión alrededor del electrodo de tierra prueba que la mayor parte de la resistencia total de puesta a tierra se concentra en la superficie del electrodo de puesta tierra. ("Medición de resistencia de tierra",2016)

## 2.2.1 VALORES DE RESISTENCIA PARA PUESTAS A TIERRA.

Según el Código Nacional Eléctrico (CNE), Reglamento nacional de edificaciones, National Fire Protection Association(NFPA) y Normas del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de la resistencia para puesta a tierra son:

Tabla 1.- Valores de resistencia para puestas a tierra

ÍTEM	POZO A TIERRA RELACIONADO A:	RESISTENCIA MAXIMA ( $\Omega$ )
1	Puesta a tierra con un solo electrodo - Código Nacional Eléctrico ( Suministro 2011 )	25
2	Grifos, estaciones de servicios y locales de alto riesgo de ignición, con presencia de líquidos altamente inflamables - NFPA 70 Código Eléctrico Nacional	10
3	Puesta a tierra para descargas atmosféricas - NFPA 780 Norma para la instalación de protección contra rayos	10
4	Puesta a tierra independiente para el ascensor - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú	10
5	En localidades aisladas o zonas rurales con sistemas de baja tensión con neutro con múltiples puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra del neutro en los puntos más desfavorables, estando conectadas todas las puestas a tierra. - Código Nacional Eléctrico ( Suministro 2011 )	10
6	En centro urbano o urbano rural con sistemas de baja tensión con neutro con múltiples puesta a tierra, la resistencia de puesta a tierra del neutro en los puntos más desfavorables, estando conectadas todas las puestas a tierra. - Código Nacional Eléctrico ( Suministro 2011 )	6
7	Locales para explosivos. - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú	5
8	Sistemas electrónicos y de cómputo. - NFPA 70 Código Eléctrico Nacional	5
9	Subestaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales. - IEEE 142 Puesta a tierra de sistemas eléctricos industriales y comerciales	5
10	Grandes subestaciones, estaciones de generación y líneas de transmisión. - IEEE 142 Puesta a tierra de sistemas eléctricos industriales y comerciales	1

## 2.2.2 Resistividad del suelo.

La resistividad del terreno es la resistencia que presenta al paso de la corriente un cubo de terreno de 1 metro de arista. Se mide en  $\Omega \cdot m$  y se representa con la letra  $\rho$ , en la figura se muestra un cubo de terreno de 1 metro por 1 metro:

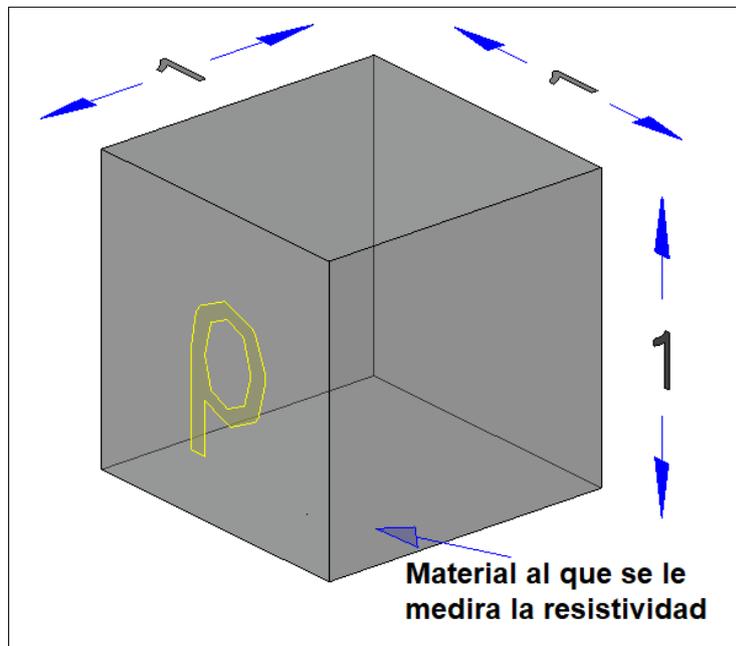


Figura 6.- Resistividad de un cubo de terreno de 1 m de lado

Fuente: Martínez, 1997

Donde:

- Ecuación 1.

Dimensiones de  $\rho$ :

$$R = \rho \cdot (L/S)$$

$$\rho = R \cdot S / L \text{ (}\Omega \cdot m^2/m\text{)} = \Omega \cdot m \quad \text{Ecuación (1)}$$

- Ecuación 2.

Dimensiones de  $\rho$ , para un cubo de 1m de lado:

$$R (\Omega) = \rho \cdot L (m) / S (m^2)$$

$$R (\Omega) = \rho \cdot 1 (m) / 1 \cdot 1 (m^2)$$

$$R (\Omega) = \rho / 1m \quad \text{Ecuación (2)}$$

- Ecuación 3.

Despejando  $\rho$ :

$$\rho = R (\Omega \cdot m) \quad \text{Ecuación (3)}$$

- R = Resistencia ( $\Omega$ )
- $\rho$  = Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
- L= Longitud (m)
- S= Sección (m<sup>2</sup>)

La resistividad del terreno depende de la naturaleza, estratigrafía (capas de distintas composición), contenido de humedad, salinidad y temperatura. La resistividad de un terreno se ve afectada por las variaciones estacionales.

Por otro lado, a medida que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y esta mayor resistividad que la arcilla. La resistividad se ve así mismo por el grado de compactación, disminuyendo al aumentar esta.

Debido a la no uniformidad de sus diferentes capas, cuando queremos determinar la resistividad en un punto del terreno, por medio de un método de medida, lo que determinamos es la resistividad media de las capas comprendidas entre la superficie y una cierta profundidad, que a veces se denomina resistividad aparente  $\rho_a$ . (Martínez, 1997)

### **2.2.3 Elementos que influyen en la resistividad del terreno.**

En la resistividad del terreno influyen los siguientes factores:

#### **2.2.3.1 Naturaleza del terreno**

Los terrenos son buenos, regulares o malos conductores en función de su naturaleza. El conocimiento de su naturaleza es el primer paso para la implantación de una adecuada toma de tierra.

La tabla 2, describe valores de resistividad para terrenos de diferente naturaleza.

Tabla 2.- Resistividad según la naturaleza del terreno.

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>Resistividad en <math>\Omega</math>. m</b>
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos de gres procedentes de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600

Para cálculos aproximados de la resistencia de tierra pueden utilizarse los valores medios recogidos en la tabla 3

Tabla 3.- Valores medios de resistividad.

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>Valor medio de la resistividad <math>\Omega</math>. m</b>
Terrenos cultivables, fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas Secas permeables.	3000

En las tablas se puede observar que a medida que la roca es más compacta y más antigua la resistividad es mayor. (Martínez, 1997)

### 2.2.3.2 Humedad

El agua que contiene el terreno, su estado higrométrico, influye de forma apreciable sobre la resistividad: al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En cualquier caso, siempre que se añada agua a un terreno disminuye su resistividad respecto a la que tendría en seco.

Se dice que un terreno está saturado de agua cuando todos sus intersticios están llenos de agua. Una vez pasada la causa de la saturación el agua contenida en los espacios entre los diferentes agregados, debido a la gravedad se dirigirá hacia abajo quedando estos inter espacios ocupados por el aire en el interior de los agregados, al ser superior de capilaridad que la gravedad. El agua contenida en ellos no se mueve y en estas circunstancias, se dice que el terreno está saturado de humedad.

Por efecto de la evaporación natural de la superficie se produce un empobrecimiento del agua contenida en los agregados, fenómeno que se propaga lentamente desde la superficie hasta los estratos más profundos. Este fenómeno tiene más importancia cuanto más seco sea el clima del lugar y cuanto más superficial es la colocación de la pica en la tierra.

El agua disocia las sales en iones y cationes que se encargan de trasportar los electrones por el terreno. Para comprender este fenómeno solo tenemos que recordar el comportamiento eléctrico del agua. El agua destilada es aislante y aunque introduzcamos unos electrodos en el interior de un recipiente conectados a una pila no circulara energía eléctrica a través de ella. Si al agua le añadimos una sal, por ejemplo cloruro de sodio o sal común, empezara a circular electricidad y a medida que añadamos más sal circulara más electricidad: los electrones se desplazan por el agua gracias a los iones disociados.

En los lugares de lluvias estacionales hay que tener muy presente estos fenómenos, pues en la época de lluvia el terreno presenta una resistividad muy baja mientras que en época seca la resistividad es muy alta. En algunas regiones donde estas oscilaciones estacionales son muy

acentuadas, se deben fijar valores máximos admisibles de resistividad de los terrenos, uno para la época de lluvias y otro para época seca. (Martínez, 1997)

### 2.2.3.3 Temperatura del terreno

Las características térmicas del terreno dependen de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de 0° centígrados, la resistividad aumenta muy rápidamente.

Cuando un terreno está a una temperatura inferior a 0° el agua que contiene se congela. El hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico pues la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse esta.

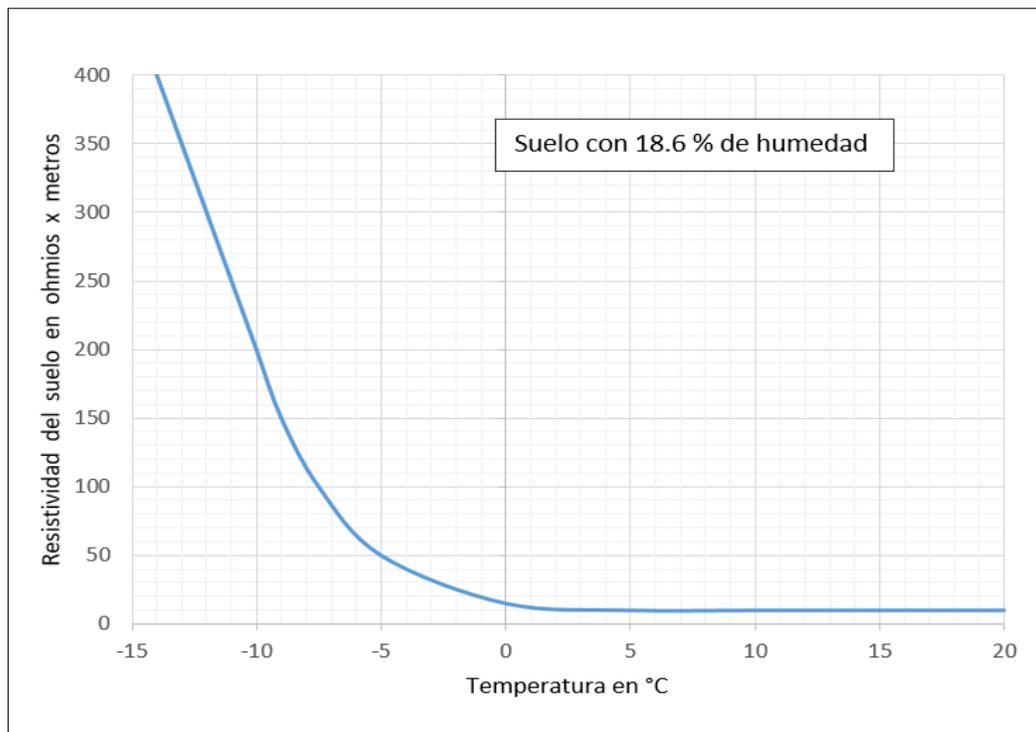


Figura 7.- Variación resistividad terreno función de temperatura.

Fuente: Martínez, 1997

La evaluación de la temperatura del terreno a las profundidades normales de colocación de las picas de tierra a lo largo del año nos indican que durante los meses de invierno, si la temperatura de la superficie es de  $-10^{\circ}\text{C}$ , a 90 cm de profundidad será de  $-4^{\circ}\text{C}$  y a 2m de profundidad tendremos una temperatura de  $-1,5^{\circ}\text{C}$ .

Por este motivo sobre todo en las zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos) deberán implantarse los electrodos de tierra a mayor profundidad con el fin de apilar al máximo el riesgo de alcanzar temperaturas por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ . (Martínez, 1997)

#### **2.2.3.4 Salinidad del terreno**

Al aumentar la salinidad del terreno disminuye la resistividad. Al hablar de la influencia del agua en la resistividad del terreno se ha mencionado indirectamente la importancia que tiene la salinidad o el contenido de sales en el terreno. Un terreno puede mejorar sensiblemente su valor de resistividad aparente o incluso hacer bueno un terreno de alta resistividad simplemente añadiéndole sales.

El método más utilizado para la mejora de la resistividad del terreno es añadir sal en las arquetas de los puntos de puesta a tierra o cerca de los electrodos si son accesibles, y después regar.

No se debe olvidar que el agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riego excesivo o unas lluvias excesivas lavan el terreno y, por lo tanto, arrastran la sal que rodea los electrodos aumentando la resistividad.

Tampoco es aconsejable la colocación de los electrodos en zonas cercanas a los cauces de los ríos, tanto superficiales como subterráneos, pues suelen ser terrenos muy lavados y por lo tanto más resistivos de lo normal. (Martínez, 1997)

### 2.2.3.5 Estratigrafía del terreno

Los terrenos están formados en profundidad por capas de diferentes agregados y por ultimo de diferentes resistividades. Su resistividad será una combinación de la resistividad de las diferentes capas y del espesor de cada una de ellas. La resistividad media o resistividad aparente será una combinación de las resistividades de todas las capas que componen el terreno. El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores obliga al estudio y medición de las mismas si se necesita conocer el valor de la toma de tierra a una profundidad determinada. En ningún caso se puede extrapolar el resultado de la capa superficial pues la variación de la composición del terreno en capas inferiores puede darnos otros valores como los que aparecen reflejados esquemáticamente en la figura.

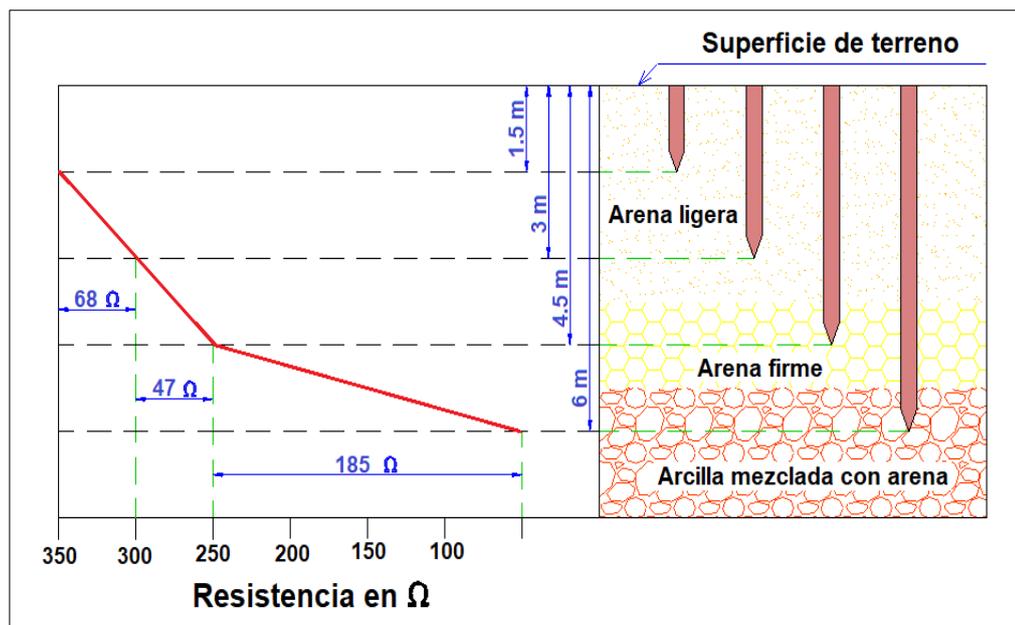


Figura 8.- Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno.

Fuente: Martínez, 1997

Lo que no ha bajado la resistividad en cinco metros baja en solo 1,5 por encontrar una capa arcillosa muy buena conductora. También nos podría haber ocurrido lo contrario y encontrar una capa muy resistiva que no disminuyera la resistividad o simplemente una oquedad del terreno que dejara el electrodo al aire. (Martínez, 1997).

### 2.2.3.6 Variaciones estacionales

En épocas de lluvias el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando este una resistividad menor que en el periodo de sequía, en el que el nivel freático se aleja en profundidad de la superficie.

A lo largo del año se presentan variaciones estacionales que son más acusadas cuanto más próximo a la superficie del terreno se encuentra el electrodo.

Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo más uniformemente posible a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en el terreno y proteger lo más posible el terreno de las inclemencias del tiempo.

Las revisiones periódicas de las instalaciones deben hacerse en las épocas más desfavorables para el terreno, en las zonas frías en invierno, en las zonas climáticas con lluvias estacionales en la época seca y en las zonas normales al final del verano.

A medida que introducimos más los electrodos o los coloquemos debajo de las cimentaciones del edificio, tendremos más garantías de mantener estable el valor de la resistividad. (Martínez, 1997)

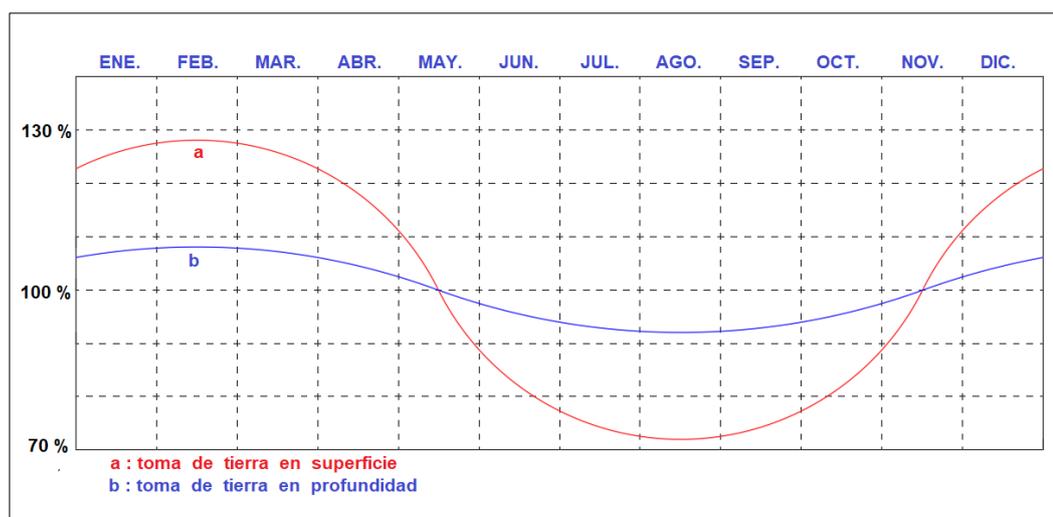


Figura 9.- Variación de la resistencia según las estaciones del año

Fuente: Martínez, 1997

### **2.2.3.7 Factores de naturaleza eléctrica**

Hay varios factores de naturaleza eléctrica que pueden modificar la resistividad de un terreno. Los más significativos son el gradiente de potencial y la magnitud de la corriente de defecto a tierra.

El primero afecta al terreno cuando el gradiente de tensión alcanza un valor crítico, de algunos kV/cm. Lo que puede originar la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

El segundo, la magnitud de la corriente de defecto a tierra, puede también modificar el comportamiento del electrodo de tierra si su valor es muy elevado, bien por provocar gradientes excesivos, o bien por dar lugar a calentamientos alrededor de los conductores enterrados que provoquen la evaporación del agua.

Otro fenómeno que hay que tener muy en cuenta es el deterioro más o menos significativo de los electrodos o el conjunto de la puesta a tierra, en el caso de un cortocircuito franco o la caída de un rayo que se canalice a través de la puesta a tierra del edificio. En estos casos es reglamentaria la comprobación de la red de tierra de la instalación ya que puede llegar a deteriorarse o fundirse si la intensidad es muy elevada (cientos o miles de amperios). (Martínez, 1997)

### **2.2.3.8 Compactación del terreno alrededor de los electrodos**

Cuando la compactación del terreno es grande disminuye la resistividad. Siempre que se coloquen electrodos de pica, la vibración de la máquina de penetración dejara una separación entre la pica y el terreno por lo que habrá que compactar para que se produzca un buen contacto pica-terreno.

Se aconseja también la compactación alrededor de los electrodos de placa y los electrodos de conductor enterrado. (Martínez, 1997)

## **2.3 Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica**

Existen varios métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica. Todos estos métodos tienen un punto de saturación, los cuales vamos a conocer para evitar diseños antieconómicos.

Los métodos para la reducción de la resistencia eléctrica son las siguientes:

### **2.3.1 El aumento de longitud de los electrodos**

La Figura 10 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada. También muestra que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta. Sin embargo, el gráfico que ilustra el comportamiento en suelo uniforme no cuenta la historia completa. El decrecimiento en resistencia obtenido mediante una barra larga puede ser particularmente deseable en condiciones de suelo no uniforme. La Figura 10 demuestra el mejoramiento posible en la resistencia de electrodo cuando se incrementa la longitud de una barra en un suelo que consiste de tres capas. Las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

A medida que la longitud de la barra aumenta, la resistencia total baja más rápido. Esto se debe a la capa más profunda con mejores propiedades eléctricas. En este caso es clara la mejoría de comportamiento con cada metro adicional de barra instalada, mucho mayor a esta profundidad que para barra en suelo uniforme. Una vez que la barra alcanza aproximadamente 15 metros de longitud, hay poca diferencia en la resistencia de una barra en esta estructura de suelo, comparada con otra en un suelo uniforme de 50 ohm - metro de resistividad. Sin embargo, el mejoramiento por unidad con cada metro adicional instalado comienza a reducirse rápidamente en el caso de suelo uniforme.

En condiciones de suelo estratificado, es importante que la sección superior de la barra tenga baja resistencia longitudinal ya que esta sección proporciona la conexión a la parte inferior del electrodo que lo mejora. Esto puede realizarse ya sea usando un sector superior de cobre sólido o plateado (con recubrimiento metálico) con una sección transversal incrementada.

En algunas condiciones de terreno, particularmente donde existe un área disponible limitada, el empleo de barras verticales puede ser la opción más efectiva, pero depende de la estructura del terreno.

Finalmente, es importante notar que las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra. Normalmente deben ser de longitud suficiente de modo que estén en o cerca de napas de agua (si existen a profundidad razonable en el lugar) y bajo la línea de congelamiento. Esto significa que la impedancia sería menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y en la temperatura del suelo. (“Sistema de puesta a tierra, 2014”)

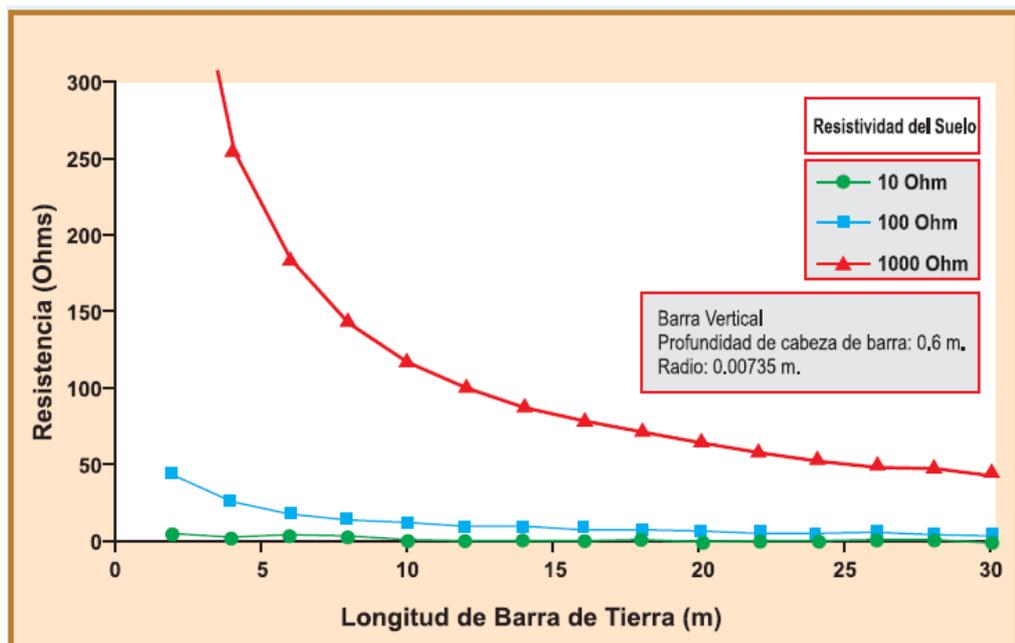


Figura 10.- Resistencia vs longitud del electrodo.

Fuente: Sistema de puesta a tierra, 2014

### 2.3.2 Incremento del radio de los electrodos

La Figura 11 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementado el radio de la barra, Hay una rápida reducción en el beneficio por unidad de incremento en el diámetro, una vez que éste excede 0,05 metros, excepto en suelos de alta resistividad, donde el mismo efecto se aprecia a un diámetro de 0,2 metros. Normalmente, hay poco que ganar aumentando el radio de electrodos de tierra por sobre lo necesario de acuerdo a los requisitos mecánicos y por corrosión. Puede usarse tubos en vez de conductores sólidos para aumentar el área superficial externa, con un aumento moderado en el volumen del metal empleado. Sin embargo, el aumento en el costo de instalación puede contrapesar el mejor comportamiento. En condiciones de suelo rocoso, puede ser ventajoso. (“Sistema de puesta a tierra, 2014”)

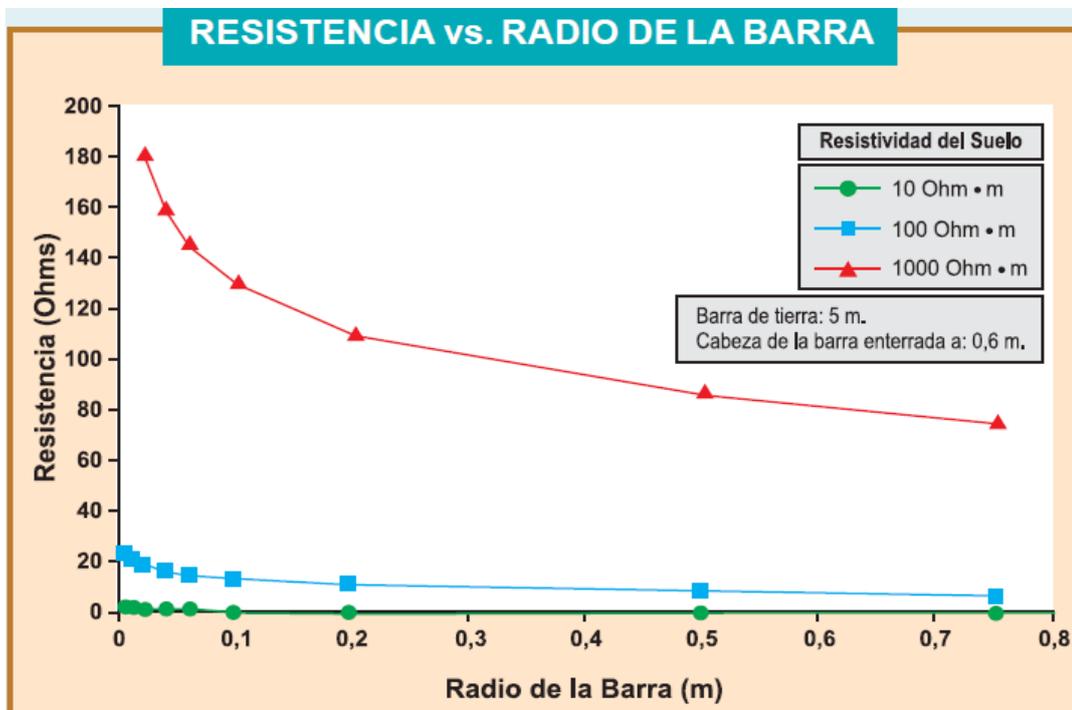


Figura 11.- Resistencia vs radio del electrodo.

Fuente: Sistema de puesta a tierra, 2014

### **2.3.3 Cambio de terreno por uno de menor ohmiaje**

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, por terreno rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son terrenos de muy alta resistividad y pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 0 a 0.50 m en todo su contorno así como en su fondo.

La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0.5 m de este, por lo que se tendrá sumo cuidado con las dimensiones de los pozos para los electrodos proyectados.

El % de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total o parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo, pero daremos una idea porcentual más menos en función al tipo de terreno y al cambio total o parcial.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de media resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiará el terreno de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del terreno.

La saturación en este caso se dará si cambiamos mayor volumen de tierra que la indicada, los resultados serán casi los mismos y el costo será mucho mayor, lo cual no se justifica. (“Manual de puesta a tierra THOR-GEL”,2013)

#### **2.3.4 Tratamiento químico del suelo**

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPAT (sistema de puesta a tierra), sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos. (“Manual de puesta a tierra THOR-GEL”,2013)

Para elegir el tratamiento químico de un SPAT se deben considerar los siguientes factores:

- Alto % de reducción inicial
- Facilidad para su aplicación
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del SPAT)
- Facilidad en su reactivación
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

- Higroscopicidad
- No ser corrosivas
- Químicamente estable en el suelo
- Inocuo para la naturaleza
- Alta conductividad eléctrica
- No ser tóxico

## **Tipos de tratamientos químicos:**

### **2.3.4.1 Cloruro de sodio (Sal)**

El Cloruro de Sodio forma una solución verdadera muy conductiva que se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de filtración, y evapotranspiración; la solución salina tiene una elevada actividad corrosiva con el electrodo, reduciendo considerablemente su tiempo de vida útil, la actividad corrosiva se acentúa si el electrodo es de hierro cobreado (cooperweld). Si bien es cierto que el cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre (por ser un metal noble) no es menos cierto que la presencia de una corriente eléctrica convertirá al sistema, cobre-solución, en una celda electrolítica con desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio en cuyo caso ya empieza la corrosión del cobre.

Si un terreno es tratado con sales, este debe hacerse periódicamente y obliga a un seguimiento frecuente del comportamiento de los valores de resistencia de tierra, pues de lo contrario este regresa a su estado natural en 3 o 4 años, ya que las sales pierden sus propiedades.

(“Manual de puesta a tierra THOR-GEL”,2013)

### **2.3.4.2 Bentonita**

Es una arcilla color pardo, de formación natural, que es levemente ácida, con un pH de 10,5. Puede absorber casi cinco veces su peso de agua y de este modo, expandirse hasta treinta veces su volumen seco. Su nombre químico es montmorillonita sódica. En terreno, puede absorber humedad del suelo circundante y ésta es la principal razón para usarla, ya que esta propiedad ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad -aproximadamente 5 ohm - metro y no es corrosiva. Bajo condiciones extremadamente secas, la mezcla puede resquebrajarse ofreciendo así poco contacto con el electrodo. La Bentonita es de carácter tixotrópica y por lo tanto se encuentra en forma de gel en estado inerte. La Bentonita se usa más a menudo como material de relleno al enterrar barras profundas. Se compacta fácilmente y se adhiere fuertemente. (“Manual de puesta a tierra THOR-GEL”,2013)

### 2.3.4.3 Cemento conductivo

El cemento conductivo incrementa el área de contacto de los electrodos en sistemas de puesta a tierra vertical u horizontal. Disminuye, así, significativamente la resistencia eléctrica de este proceso.

Se aplica alrededor de los electrodos tal como barras, cables, pletinas y planchas, ya sea en zanjas horizontales o contrapesos. Al contacto con la humedad del medio o agregada, inicia el proceso de fraguado formando un conductor eléctrico de dimensiones significativamente mayores que los originales.

Los electrodos de cobre cubiertos con cemento conductivo duran diez veces más que barras de cobre desnudas sin tratamiento; asimismo, protege al electrodo metálico de la corrosión, impidiendo el contacto directo con el terreno natural- prolongando su vida útil

Entre los beneficios tenemos:

- Vida útil mínima de 20 años.
- No requiere mantenimiento.
- Protege a la barra de cobre o cable de la corrosión.
- Seguro para el medio ambiente.
- Previene el hurto del electrodo.
- Fácil de instalar.
- Bajo costo.
- Electrodos de cobre cubiertos con cemento conductivo duran 10 veces más que los cables de cobre de conexión a tierra sin recubrimiento. (“Importancia de la puesta a tierra”,2013)

## 2.4 MEDIDA DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Es importante que la resistividad pueda verificarse en forma tan precisa como sea posible, ya que el valor de resistencia a tierra del electrodo es directamente proporcional a la resistividad del suelo. Si se usa un valor incorrecto de resistividad del terreno en la etapa de diseño, la medida de la resistencia del sistema de tierra puede resultar significativamente diferente de lo planeado. Este puede, a su vez, tener serias consecuencias financieras.

Se utilizan varios procedimientos para determinar la resistividad de los terrenos. El más usado es el Método de Werner. ("Guía de medición de tierra", 2015)

### 2.4.1 MÉTODO DE WERNER

Principios de medida:

1. Se insertan cuatro electrodos en línea recta en el suelo y a igual distancia  $a$  entre ellos.

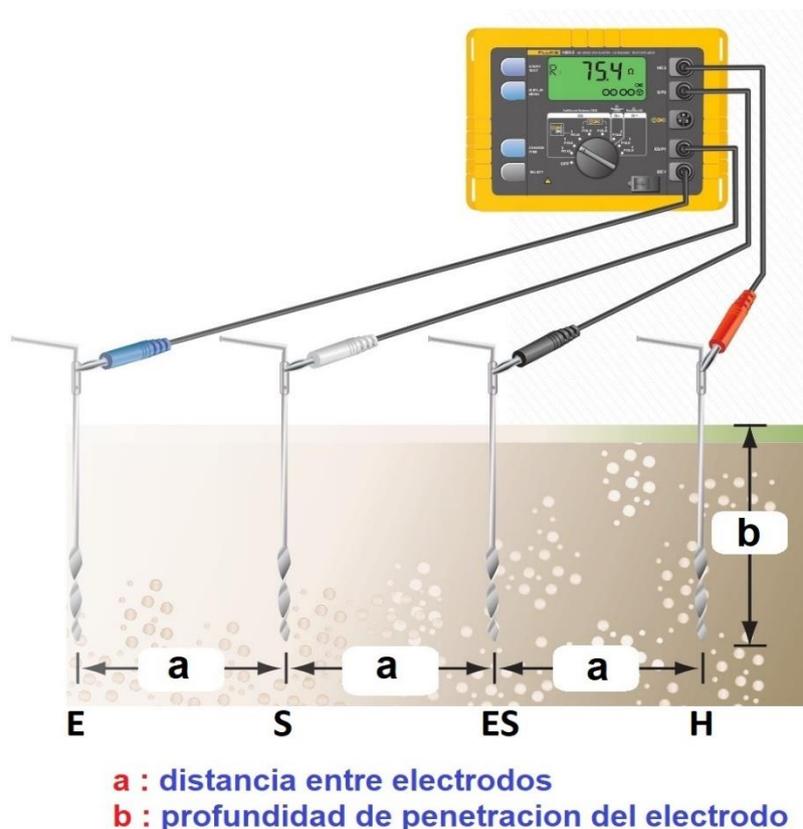


Figura 12.- Método de Werner

Fuente: Resistencia de puesta a tierra, 2017

2. Entre los dos electrodos exteriores (E y H), se inyecta una corriente de medida I desde el Teluometro.
3. Entre los dos electrodos centrales (S y ES), se mide el potencial  $\Delta V$ .
4. El instrumento de medida utilizado es un Teluometro que permite la inyección de una corriente y la medida de  $\Delta V$ .
5. El valor de la resistencia R leída en el Teluometro permite calcular la resistividad mediante la siguiente fórmula de cálculo simplificada:

$$\rho a = 2\pi a R$$

Donde:

- $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
  - R: valor indicado por el Teluometro.
  - a: distancia de entre las jabalinas, expresada en metros.
6. La forma simplificada de la ecuación de Werner puede aplicarse siempre que la profundidad de penetración de cada jabalina sea despreciable con la distancia "a". Esta condición puede ser difícil de cumplir cuando "a" es pequeño, por la necesidad de asegurar un buen contacto de la jabalina con el terreno. En este caso debe aplicarse la forma completa de la ecuación:

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

Donde:

- $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
  - R: valor indicado por el Teluometro.
  - a: distancia de entre las jabalinas, expresada en metros.
  - b: profundidad de penetración de las jabalinas auxiliares. ("Guía de medición de tierra",2015)
7. La profundidad (h) para la medida de la resistividad media es  $h=3/4$  de a.

## 2.4.2 Utilidad de la medida de resistividad

La medida de resistividad permitirá:

- Elegir la ubicación y la forma de los pozos de puesta de tierra y de las redes de tierra antes de construirlas
- Prever las características eléctricas de los pozos de puesta de tierra y de las redes de tierra
- Reducir los costos de construcción de los pozos de puesta de tierra y de las redes de tierra (ahorro de tiempo para conseguir la resistencia de tierra deseada). (“Guía de medición de tierra”,2015)

## 2.5 MEDIDA DE RESISTENCIA

Las medidas de resistividad vistas anteriormente sólo pueden aplicarse en el caso de construir una nueva puesta a tierra. Permiten prever el valor de resistencia de tierra y ajustar la construcción según el valor de tierra deseado. En el caso de puestas de tierra existentes, la operación consiste en comprobar que las medidas acatan correctamente las normas de seguridad en términos de construcción y valor de resistencia.

Se utilizan varios procedimientos para determinar la resistencia de la puesta a tierra. El más usado es el Método de 62%. (“Guía de medición de tierra”,2015)

### 2.5.1 Método de 62%

Principios de medida:

1. Este método requiere el uso de dos electrodos (o “picas”) auxiliares para permitir la inyección de corriente que se envía desde el Teluometro y la referencia de potencial 0 V. La posición de dos electrodos auxiliares, con respecto a la toma de tierra a medir E(X), es determinante.
2. Para realizar una medida correcta, la “toma auxiliar” de referencia de potencial (S) no tiene que estar clavada en las zonas de influencia de las tierras E y H, creadas por la circulación de la corriente (i).

3. Estadísticas de campo han demostrado que el método ideal para garantizar la mayor precisión de medida consiste en colocar la pica S a 62 % de E en la recta EH. Conviene luego asegurarse de que la medida no varía o poco moviendo la pica S a  $\pm 10\%$  ( $S'$  y  $S''$ ) a cada lado de su posición inicial en la recta EH. Si la medida varía, significa que (S) se encuentra en la zona de influencia. Se debe por lo tanto aumentar las distancias y volver a realizar las medidas.
  
4. El valor de la resistencia R leída en el Teluometro es el valor de la resistencia de la puesta a tierra. ("Guía de medición de tierra",2015)

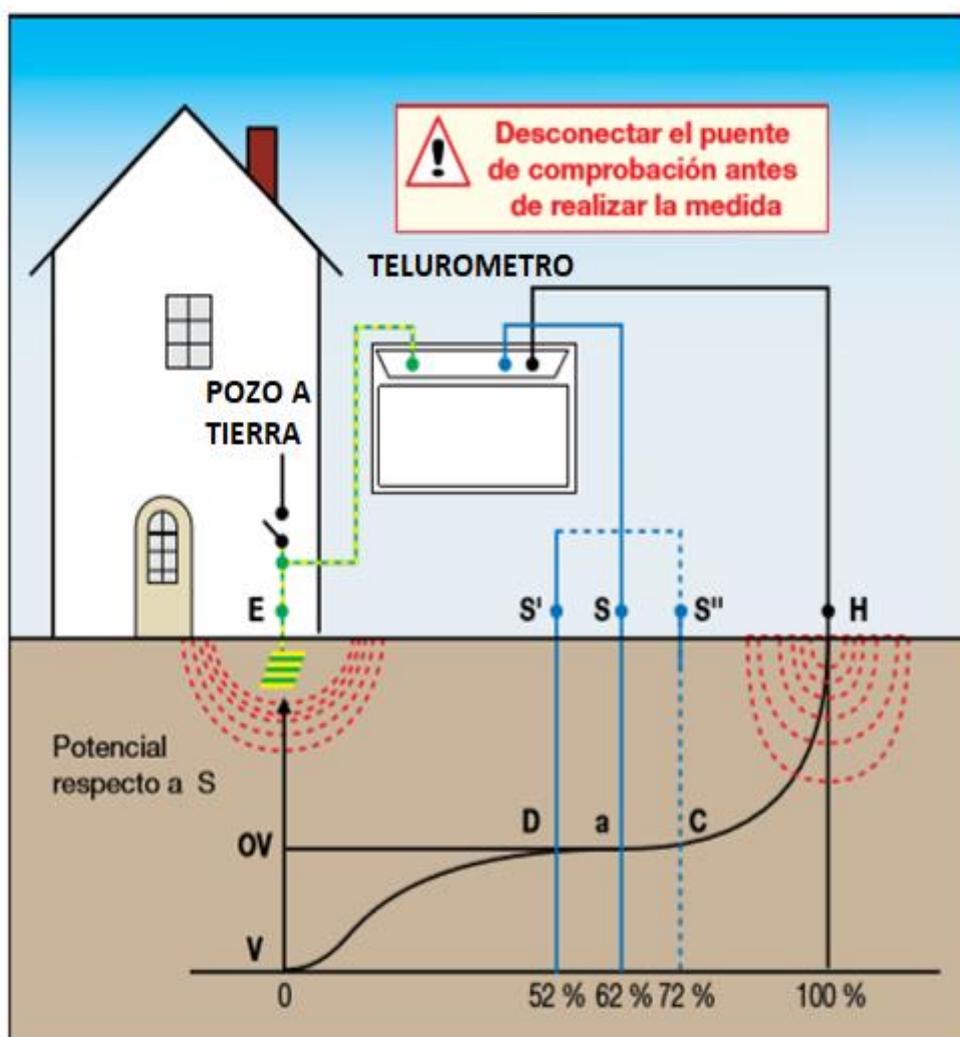


Figura 13.- Método de 62 %

Fuente: Guía de medición de tierra",2015

### **2.5.2 Utilidad de la medida de la resistencia:**

La medida de la resistencia permitirá:

- En el caso de pozos a tierra recién construidos, la operación consiste en comprobar que la medida de resistencia acatan correctamente las normas de seguridad en términos de construcción y valor de resistencia.
- En el caso de pozos a tierra existentes, la operación consiste en comprobar que las medidas siguen acatando correctamente las normas de seguridad en términos de construcción y valor de resistencia. De no ser así, deberán darse mantenimiento a los pozos de puesta a tierra para reducir la resistencia y así cumplir con las normas correspondientes. (“Guía de medición de tierra”,2015)

## 2.6 NORMATIVA RELACIONADA A SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

### NORMATIVA EN PERU:

- Código Nacional Eléctrico – Utilización, sección 60.  
Elaborado por: MINEM – Lima 2006
- Código Nacional de Electricidad (suministro 2011)  
Elaborado por: MINEN – Lima 2011
- Reglamento de seguridad y salud en el trabajo con electricidad en el 2013  
Elaborado por: MINEN – Lima 2013
- Reglamento de Seguridad Para Establecimientos de Venta al Público de Combustibles Derivados de Hidrocarburos  
Elaborado por: MINEN – Lima 1993
- Reglamento Nacional de Edificaciones  
Elaborado por: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - 2006
- Norma Técnica Peruana 370.052 –SEGURIDAD ELECTRICA. Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra.  
Elaborado por: Indecopi - Lima 1999
- Norma Técnica Peruana 370.053:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Elección de los materiales eléctricos en las instalaciones interiores para puesta a tierra. Conductores de protección de cobre.  
Elaborado por: Indecopi – Lima 1999
- NTP 370.054:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Enchufes y tomacorrientes con protección a tierra para uso doméstico y uso general similar  
Elaborado por: Indecopi – Lima 1999
- Norma Técnica Peruana 370.055:1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA. Sistema de puesta a tierra. Glosario de términos  
Elaborado por: Indecopi - Lima 1999
- Norma Técnica Peruana 370.056:1999 SEGURIDAD ELECTRICA. Electrodo de cobre para puesta a tierra  
Elaborado por: Indecopi - Lima 1999
- Manual para la ejecución de inspecciones técnicas de seguridad en defensa civil  
Elaborado por: Indeci – Lima 2008

De manera complementaria, el Código Nacional Eléctrico establece que ante la ausencia de criterios, información insuficiente u obsoleta, debemos referirnos a la normatividad internacional vigente (IEEE, IEC, NFPA o similar).

#### **NORMATIVA A NIVEL INTERNACIONAL:**

- IEEE Std 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEEE Std 81 Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance ,  
and Earth Surface Potentials of a Ground System  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEEE Std 142 Grounding of Industrial and Commercial Power System  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEEE Std 837 Standard for Qualifying Permanent Connections  
used in Substation Groundings.  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEEE Std 367 Determining the Electric Power Station Ground  
Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault.  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEEE Std. 1100 Recommended Practice for Powering and Grounding  
Sensitive Electronic Equipmen  
Elaborado por: IEEE Power Engineering Society
- IEC 60479 -1 Effects of Current in human beings and livestock.  
Elaborado por: International Electrotechnical Commission
- NFPA 70 National Electrical Code  
Elaborado por: National Fire Protection Association
- NFPA 780 Standard for the Installation of Lightning Protection Systems  
Elaborado por: National Fire Protection Association

## **2.7 MATERIALES DE UN POZO A TIERRA VERTICAL CLÁSICO**

De manera común se construyen los pozos a tierra vertical con los siguientes materiales y sus respectivas cantidades:

### **ELECTRODO DE COBRE:**

- El electrodo de cobre más comerciables es el de 5/8"x2.4 m así como el de 3/4"x2.4 m

### **CONECTOR DE COBRE DEL ELECTRODEO**

- La medida de este conector de cobre depende del diámetro del electrodo de cobre siendo el de 5/8" y el de 3/4" los más comerciables

### **CAJA DE REGISTRO**

- La NTP 370.052 recomienda que la protección externa del pozo (caja de registro) tenga un diámetro de 10 cm mínimo y una profundidad de 40 cm mínimo, sin embargo estas medidas mínimas no son obligatorias sino una recomendación.

La caja de registro puede ser de material:

- CONCRETO, generalmente de tapa cuadrada 40.5 cm x 40.5 cm con una profundidad de 30 cm
- POLIPROPILENO: generalmente de tapa circular de diámetro 30 cm con una profundidad de 26 cm
- Otros materiales similares

### **TIERRA DEL TERRENO / TIERRA DE CHACRA**

- La NTP 370.052 recomienda emplear el mismo material del terreno donde se ubica el pozo a tierra, eliminando los elementos pesados y de alta resistividad, tales como piedras y elementos extraños e impurezas.
- También se puede utilizar tierra de chacra (terreno agrícola) la cual tiene una resistividad promedio de 50  $\Omega$ .m, al ser menor el valor de la resistividad por lo tanto el valor de la resistencia del pozo se reducirá considerablemente.
- Pozo a tierra vertical generalmente es dimensiones (1m x 1m) x 3m = 3m<sup>3</sup>

## CEMENTO CONDUCTIVO

- Por recomendación se utiliza 2 sacos de 25 Kg para la preparación de cemento conductivo la cual tendrá una forma cilíndrica de longitud 2.4 m y diámetro 4" ( 0.1 m aprox.) el cual rodeara al electrodo de cobre

## BENTONITA

- Por recomendación se utiliza 2 sacos de 30 Kg de bentonita para un pozo a tierra vertical de 3m<sup>3</sup> de volumen

## SAL INDUSTRIAL

- Por recomendación se utiliza 2 sacos de 50 Kg de bentonita para un pozo a tierra vertical de 3m<sup>3</sup> de volumen

Tabla 4.- Cuadro resumen de los materiales de un pozo a tierra vertical clásico.

ITEM	MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	USO OBLIGATORIO	COMENTARIO
1	Electrodo de cobre	1	unidad	SI	longitud de 2.4m y diámetro de 5/8" ( forma cilíndrica )
2	Conector de cobre	1	unidad	SI	para electrodo de diámetro 5/8"
3	Caja de registro	1	unidad	SI	
4	Tierra del terreno o tierra de chacra	3	m3	SI	( 1 m x 1 m ) x 3 m = 3 m <sup>3</sup>
5	Cemento conductivo	50	Kg	NO	longitud 2.4 m y diámetro 4" ( forma cilíndrica )
6	Bentonita	60	Kg	NO	02 sacos de 30 Kg
7	Sal industrial	100	Kg	NO	02 sacos de 50 Kg

Ilustración de un pozo a tierra vertical clásico:

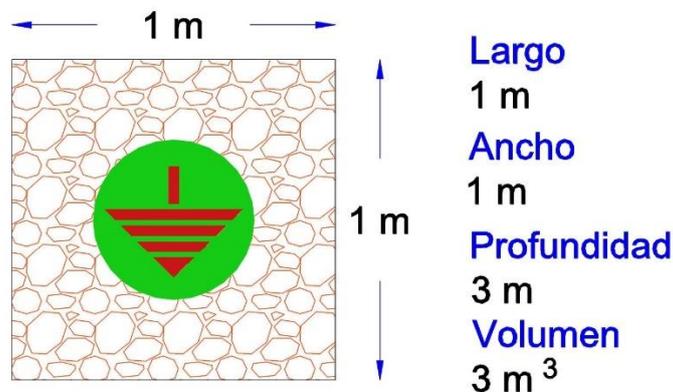


Figura 14.- Vista superior del pozo a tierra vertical clásico

Fuente: autoría propia

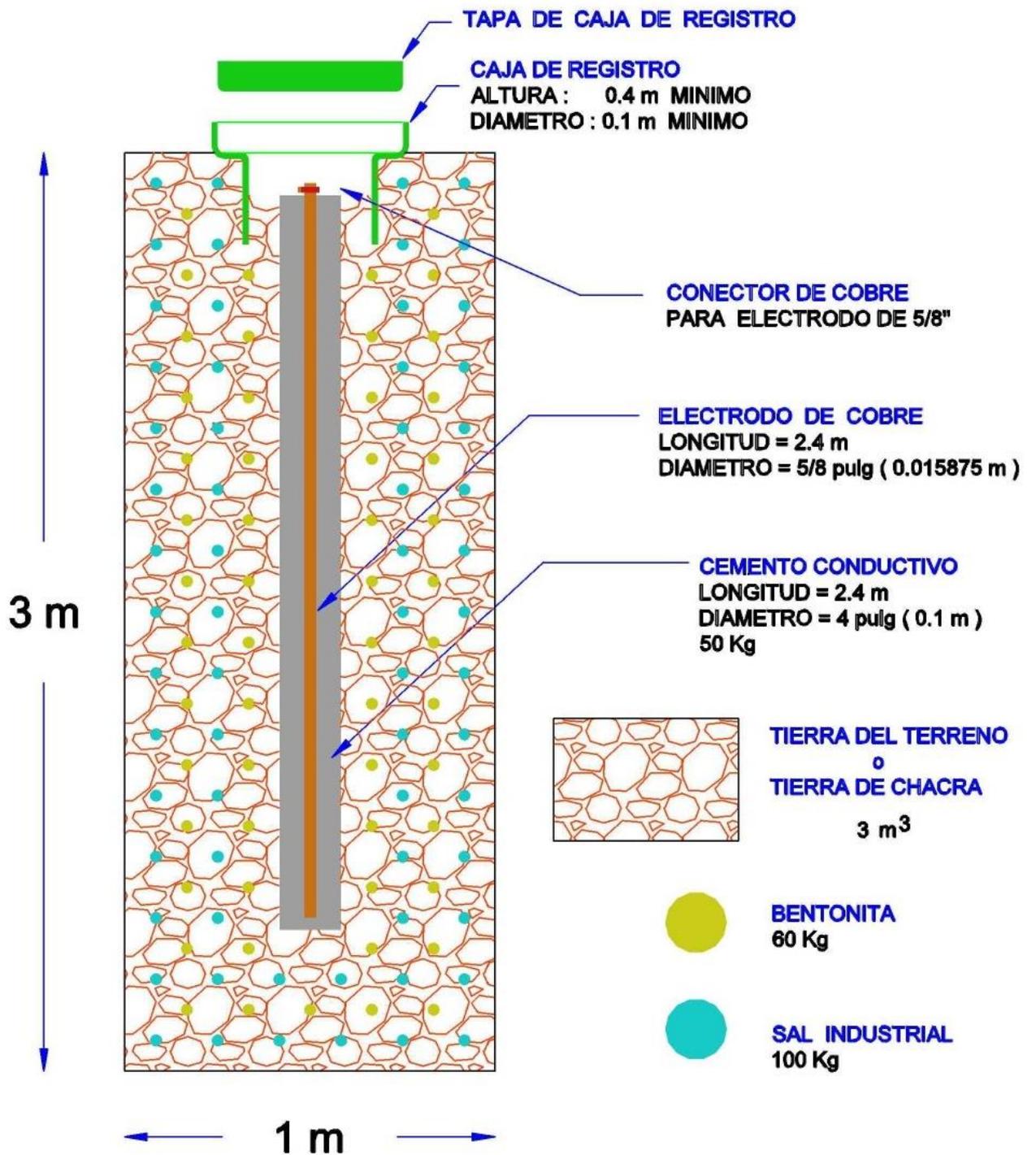


Figura 15.- Vista frontal de un pozo a tierra vertical clásico

Fuente: autoría propia

# **CAPÍTULO III**

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3.1 MATERIALES

Materiales analizados que influyen en la variación de la resistencia de un PAT.

- Electrodo
- Cemento conductivo
- Bentonita
- Sal

### EQUIPOS

- Teluometro de marca Megabras y modelo MTD – 20KWe

### 3.2. PROCEDIMIENTO

#### 3.2.1 PROCEDIMIENTO PARA ANALIZAR LA INFLUENCIA DEL ELECTRODO EN LA RESISTENCIA

##### PASO 1:

- Se mide la resistividad del terreno, de tal manera que la resistividad calculada por el Teluometro mediante el método de Werner, llegue hasta 1 m de profundidad, Para ello la separación entre las 4 picas es 4/3 m el cual es representado por la letra “a”
- Según el método de Werner  $h=3/4 a$  , para  $h=1$  entonces  $a = 4/3$
- La distancia entre las picas serán de 4/3 metros y la profundidad de las picas es 0.3 m.
- Se mide la resistividad con el Teluometro, esta resistividad se usa junto a la fórmula  $R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{a} \right) - 1 \right] / 2\pi L$  y debe hallar una resistencia teórica las cuales serán comparadas con las resistencias tomadas en campo.

##### PASO 2:

- Se clava de manera vertical el electrodo sobre el terreno, primero con una profundidad de 0.1 m, se procede a medir con el Teluometro. El método usado para hallar la resistencia es el método del 62% para ellos la primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

### **PASO 3:**

- El electrodo se vuelve a clavar con un martillo hasta una profundidad de 0.2 m y se procede a medir con el Teluometro. Se realiza el mismo procedimiento para las profundidades de 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m, 0.6 m, 0.7 m, 0.8 m, 0.9 m y 1 m.

### **PASO 4:**

- Se apuntan los 10 valores de resistencia tomados en campo y se compara con las resistencias que saldrían según la fórmula de la resistencia para un electrodo.

## **3.2.2. PROCEDIMIENTO PARA ANALIZAR LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN AL DIÁMETRO DEL CILINDRO FORMADO POR EL CEMENTO CONDUCTIVO ALREDEDOR DEL ELECTRODO**

### **PASO 1:**

- Se mide la resistividad del terreno de tal manera que la resistividad calculada por el Teluometro con el método de Werner llegue hasta 1 m de profundidad, debido a que se quiere medir la resistencia de un electrodo hasta la profundidad de 1 m.
- Según el método de Werner  $h=3/4 a$ , para  $h=1$  entonces  $a = 4/3$
- La distancia entre las picas serán de  $4/3$  metros y la profundidad de las picas es 0.3 m.
- Se mide la resistividad con el Teluometro, esta resistividad se usa junto a la fórmula  $R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{a} \right) - 1 \right] / 2\pi L$  y debe hallar una resistencia teórica las cuales serán comparadas con las resistencias tomadas en campo.

### **PASO 2:**

- Se clava el electrodo de 5/8" a una profundidad de 1 m y se procede a medir con el Teluometro. El método usado para hallar la resistencia es el método del 62% para ellos la primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

### **PASO 3:**

- Se prepara la mezcla de cemento conductor y se hecha la mezcla dentro del tubo de 2" y de longitud de 1 m, de manera inmediata se coloca el electrodo dentro del tubo.

### **PASO 4:**

- Se espera 24 horas para que el cemento conductor endurezca. Luego se procede a retirar el tubo para lo cual con una navaja se corta el tubo y quedando así el electrodo revestido de cemento conductor.

### **PASO 5:**

- Se procede a instalar el electrodo revestido de cemento conductor a una profundidad de 1m.

### **PASO 6:**

- Se procede a medir con el Teluometro. El método usado para hallar la resistencia es el método del 62% para ellos la primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

### **PASO 7:**

- Se realiza lo mismo pero con una tubería de 4". Se repiten los paso 4 y 5.

### **PASO 8:**

- Se apuntan los 3 valores de resistencia tomados en campo y se compara con las resistencias que saldrían según la fórmula de la resistencia para un electrodo revestido con cemento conductor

## **3.2.3 PROCEDIMIENTO PARA ANALIZAR LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN A LA CANTIDAD DE LA BENTONITA**

### **PASO 1:**

- Elegir y dimensionar el terreno en que se va realizar las pruebas de resistencia y resistividad. Remarcar sobre el terreno la ubicación de las 4 picas auxiliares

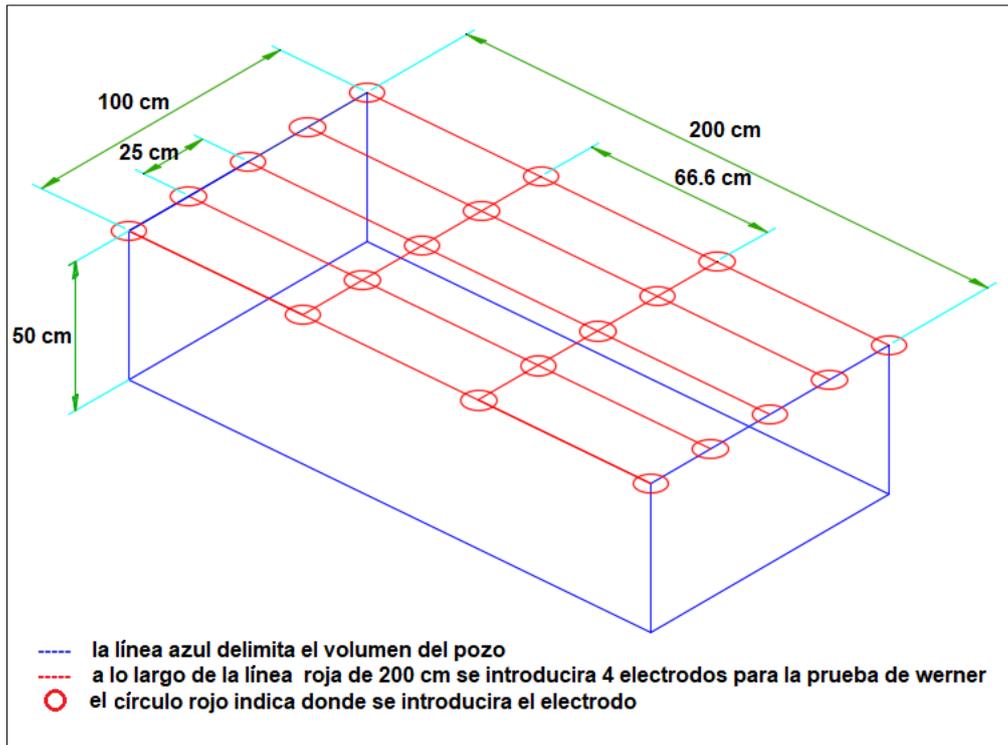


Figura 16.- Dimensiones del pozo que será tratado con bentonita para la prueba de resistividad.

Fuente: autoría propia

### PASO 2:

- Se trazaron líneas paralelas de 2 metros de largo y estas entre si están separadas a 0.25 m, es decir 1 metro de distancia entre la primera línea y la quinta línea).
- En cada línea se instalaron las 4 picas auxiliares las cuales tuvieron una distancia entre ellas de 0.66 m, es decir 2 m de distancia entre la primera pica auxiliar y la última.

### PASO 3:

- Se clavaron las 4 picas auxiliares en la primera línea de 2 metros y se realizó la medida de su resistividad con el Teluometro. Lo mismo se realizó en las otras 4 líneas, cada una con una medida de resistividad. Luego de hallar las 5 resistividades se procede a promediar los 5 valores y se toma el promedio como la resistividad final.

#### PASO 4:

- Se cava el terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m, se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico. Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg de bentonita, el cual previamente se la diluyo en 40 litros de agua. La tierra tratada con bentonita se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2 y 3.

#### PASO 5:

- Se clava de manera vertical el electrodo (justo en el medio del pozo) sobre el terreno a una profundidad de 1m se procede a medir con el Teluometro. El método usado para hallar la resistencia es el método del 62% para ellos la primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

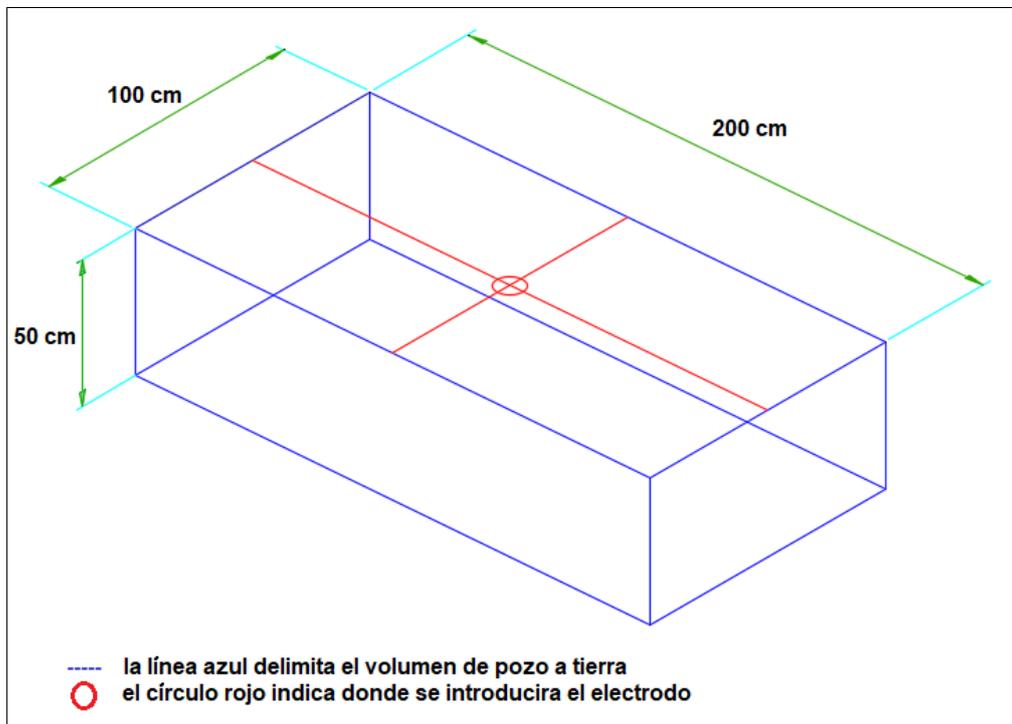


Figura 17.- Dimensiones del pozo que será tratado con bentonita para la prueba de resistencia.

Fuente: autoría propia

#### **PASO 6:**

- Se vuelve a cavar sobre el mismo terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m ( 1m<sup>3</sup>), se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico.

Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg más de bentonita, el cual previamente se la diluyo en 120 litros de agua. Lo cual hace que contenga un total de 40 kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra. La tierra tratada con bentonita se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2, 3 y 5.

#### **PASO 7:**

- Se vuelve a cavar sobre el mismo terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m ( 1m<sup>3</sup>), se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico.

Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg más de bentonita, el cual previamente se la diluyo en 120 litros de agua. Lo cual hace que contenga un total de 60 kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra. La tierra tratada con bentonita se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2, 3 y 5.

#### **PASO 8:**

- Se apuntan los 4 valores de resistencia tomados en campo y se compara con las resistencias que saldrían según la fórmula de la resistencia para un electrodo.

### **3.2.4 PROCEDIMIENTO PARA ANALIZAR LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA EN FUNCIÓN A LA CANTIDAD DE LA SAL**

#### **PASO 1:**

- Elegir y dimensionar el terreno en que se va realizar las pruebas de resistencia y resistividad. Remarcar sobre el terreno la ubicación de las 4 picas auxiliares

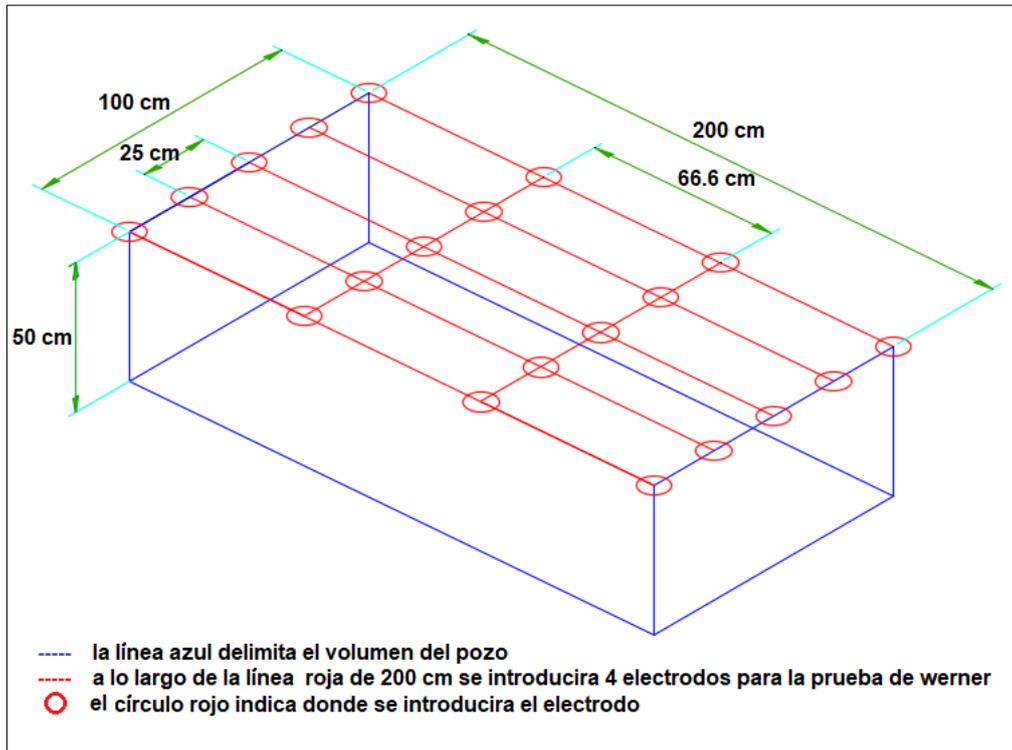


Figura 18.- Dimensiones del pozo que será tratado con sal para la prueba de resistividad.

Fuente: autoría propia

### PASO 2:

- Se trazaron líneas paralelas de 2 metros de largo y estas entre si están separadas a 0.25 m, es decir 1 metro de distancia entre la primera línea y la quinta línea).
- En cada línea se instalaron las 4 picas auxiliares las cuales tuvieron una distancia entre ellas de 0.66 m, es decir 2 m de distancia entre la primera pica auxiliar y la última.

### PASO 3:

- Se clavaron las 4 picas auxiliares en la primera línea de 2 metros y se realizó la medida de su resistividad con el Teluometro. Lo mismo se realizó en las otras 4 líneas, cada una con una medida de resistividad. Luego de hallar las 5 resistividades se procede a promediar los 5 valores y se toma el promedio como la resistividad final.

#### PASO 4:

- Se cava el terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m, se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico. Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg de sal. La tierra tratada con sal se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2 y 3.

#### PASO 5:

- Se clava de manera vertical el electrodo (justo en el medio del pozo) sobre el terreno a una profundidad de 0.5 m y se procede a medir con el Teluometro. El método usado para hallar la resistencia es el método del 62% para ellos la primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

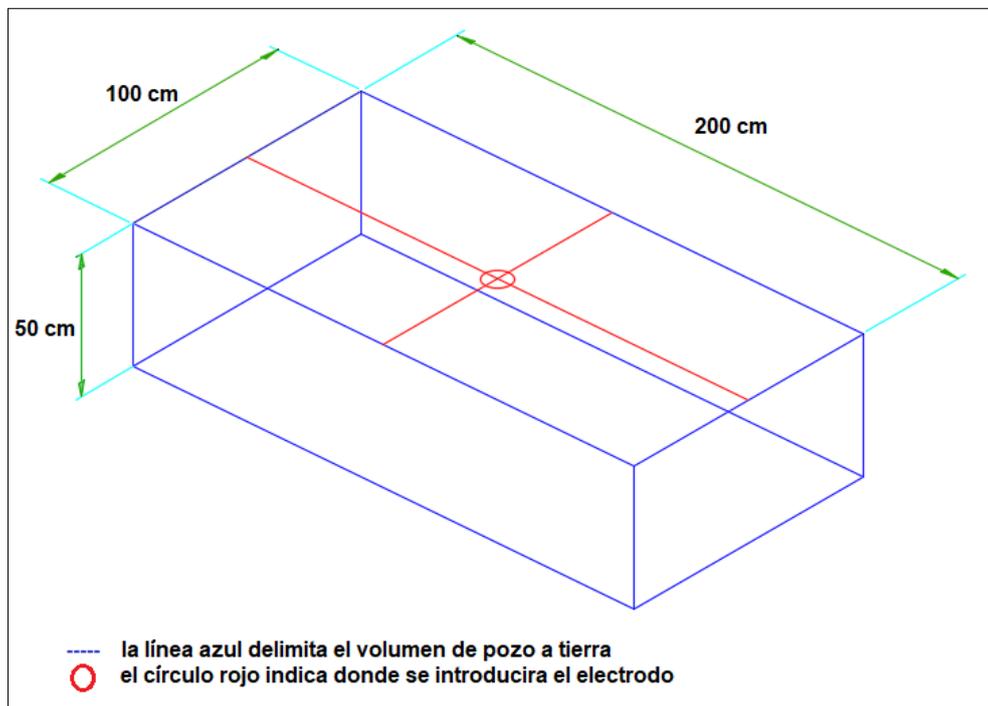


Figura 19.- Dimensiones del pozo que será tratado con bentonita para la prueba de resistencia.

Fuente: autoría propia

**PASO 6:**

- Se vuelve a cavar sobre el mismo terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m ( 1m<sup>3</sup> ), se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico. Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg más de sal. Lo cual hace que contenga un total de 40 kg de sal en 1m<sup>3</sup> de tierra. La tierra tratada con sal industrial se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2, 3 y 5.

**PASO 7:**

- Se vuelve a cavar sobre el mismo terreno de dimensiones 2m x 1m x 0.5m ( 1m<sup>3</sup> ), se retira toda la tierra la cual será depositada sobre un plástico. Esta tierra que se encuentra en el plástico se combina con los 20 kg más de sal. Lo cual hace que contenga un total de 60 kg de sal en 1m<sup>3</sup> de tierra. La tierra tratada con sal se vuelve a echar al pozo. Se realiza los pasos 2, 3 y 5.

**PASO 8:**

- Se apuntan los 4 valores de resistencia tomados en campo y se compara con las resistencias que saldrían según la fórmula de la resistencia para un electrodo.

### 3.3 MÉTODOS

#### 3.3.1 MÉTODO DE WERNER

❖ Para hallar la resistividad se utilizara el método de Werner.

##### Principios de medida:

1. Se insertan cuatro electrodos en línea recta en el suelo y a igual distancia  $a$  entre ellos.

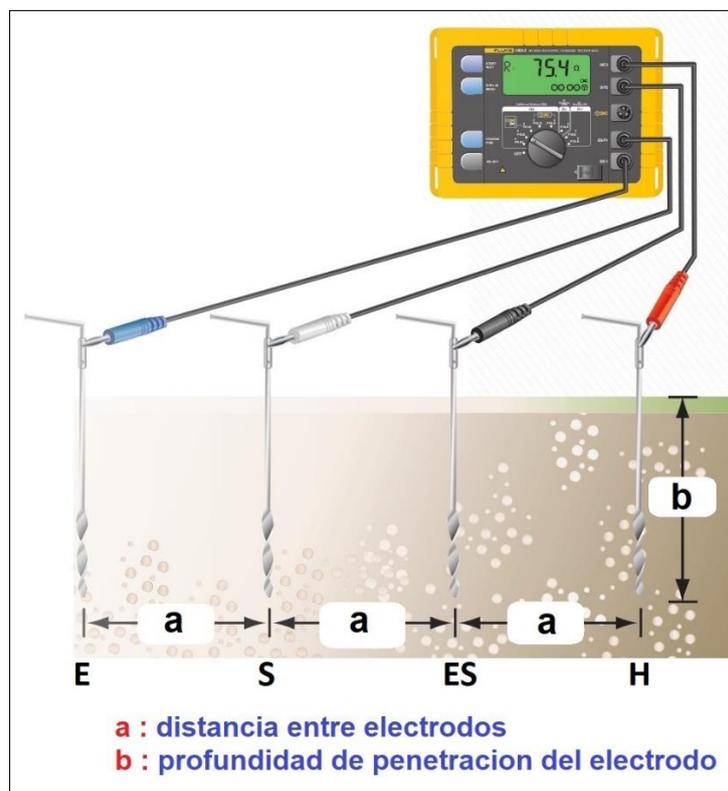


Figura 20.- Método de Werner

Fuente: Resistencia de puesta a tierra, 2017

2. Entre los dos electrodos exteriores (E y H), se inyecta una corriente de medida  $I$  desde el Teluómetro.
3. Entre los dos electrodos centrales (S y ES), se mide el potencial  $\Delta V$ .
4. El instrumento de medida utilizado es un Teluómetro que permite la inyección de una corriente y la medida de  $\Delta V$ .

5. El valor de la resistencia R leída en el Teluometro permite calcular la resistividad mediante la siguiente fórmula de cálculo simplificada:

$$\rho a = 2\pi a R$$

Donde:

- $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
- R: valor indicado por el Teluometro.
- a: distancia de entre las jabalinas, expresada en metros.

6. La forma simplificada de la ecuación de Werner puede aplicarse siempre que la profundidad de penetración de cada jabalina sea despreciable con la distancia "a". Esta condición puede ser difícil de cumplir cuando "a" es pequeño, por la necesidad de asegurar un buen contacto de la jabalina con el terreno. En este caso debe aplicarse la forma completa de la ecuación:

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

Donde:

- $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
- R: valor indicado por el Teluometro.
- a: distancia de entre las jabalinas, expresada en metros.
- b: profundidad de penetración de las jabalinas auxiliares.

7. La profundidad (h) para la medida de la resistividad media es  $h = 3/4 a$ .

### 3.2.2 Método de 62%

- ❖ Para hallar la resistencia se utilizara el método de 62%

#### Principios de medida:

1. Este método requiere el uso de dos electrodos (o “picas”) auxiliares para permitir la inyección de corriente que se envía desde el Teluometro y la referencia de potencial 0 V. La posición de dos electrodos auxiliares, con respecto a la toma de tierra a medir E, es determinante.
2. Para realizar una medida correcta, la “toma auxiliar” de referencia de potencial (S) no tiene que estar clavada en las zonas de influencia de las tierras E y H, creadas por la circulación de la corriente (i).
3. Estadísticas de campo han demostrado que el método ideal para garantizar la mayor precisión de medida consiste en colocar la pica S a 62 % de E en la recta EH. Conviene luego asegurarse de que la medida no varía o poco moviendo la pica S a  $\pm 10\%$  (S' y S'') a cada lado de su posición inicial en la recta EH. Si la medida varía, significa que (S) se encuentra en la zona de influencia. Se debe por lo tanto aumentar las distancias y volver a realizar las medidas.
4. El valor de la resistencia R leída en el Teluometro es el valor de la resistencia de la puesta a tierra.

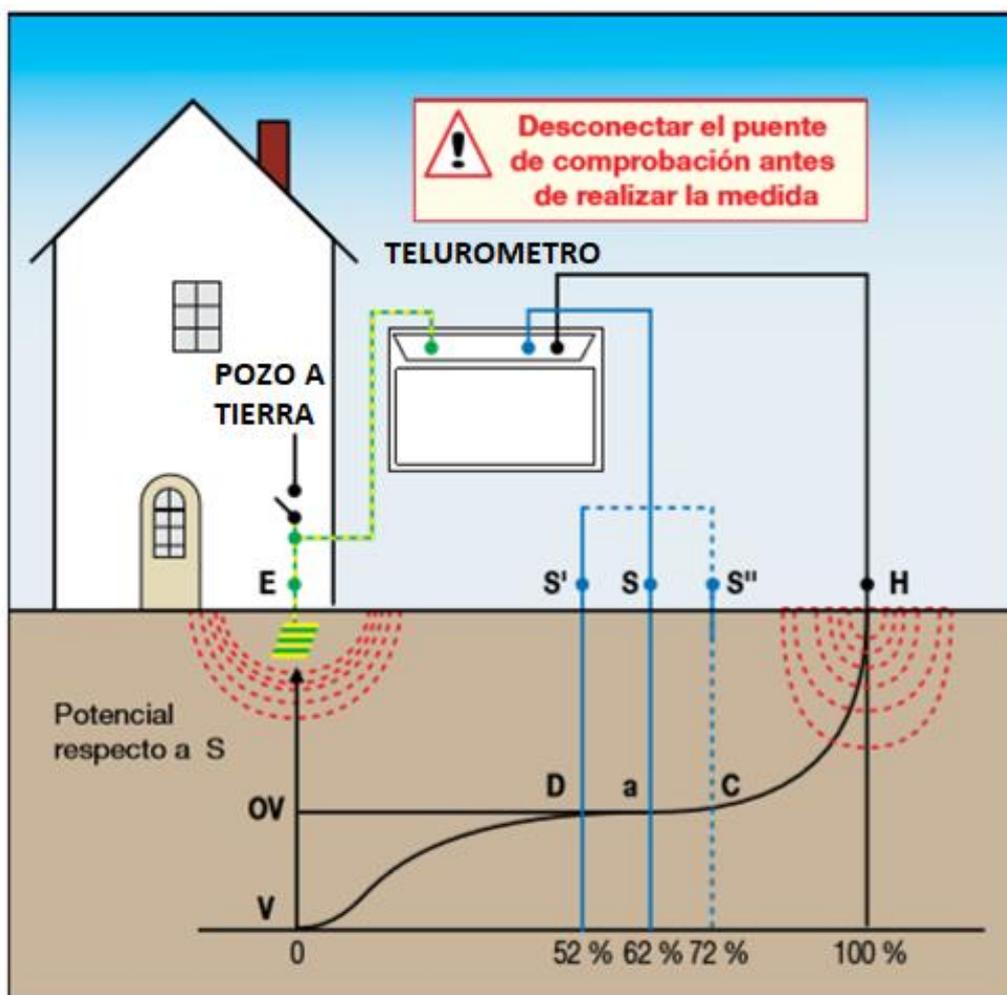


Figura 21.- Método del 62%  
 Fuente: Guía de la medición de tierra, 2015

# **CAPÍTULO IV**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1 REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA CUANDO SE INCREMENTA LA LONGITUD DEL ELECTRODO

##### 1. Análisis de la fórmula de la resistencia

El valor de la resistencia es:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

- R: Resistencia ( $\Omega$ )
- $\rho$ : Resistividad ( $\Omega.m$ )
- L: longitud del electrodo (m)
- d: diámetro del electrodo (m)

Analizaremos R en función de la longitud del electrodo (L)

Para ello:

- L: 0.2 a 10 metros
- d: 5/8" (0.015875 m) Diámetro del electrodo
- K :  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$  , toma un valor constante cuando se precisa el valor de L y d
- $\rho$ : 100%  $\rho$   $\Omega.m$ , Le damos un valor de (100%  $\rho$ )  $\Omega.m$  para facilitar la gráfica.

Quedando la formula general:

$$R = \rho K = 100\% \rho K$$

2. Se obtiene los siguientes resultados:

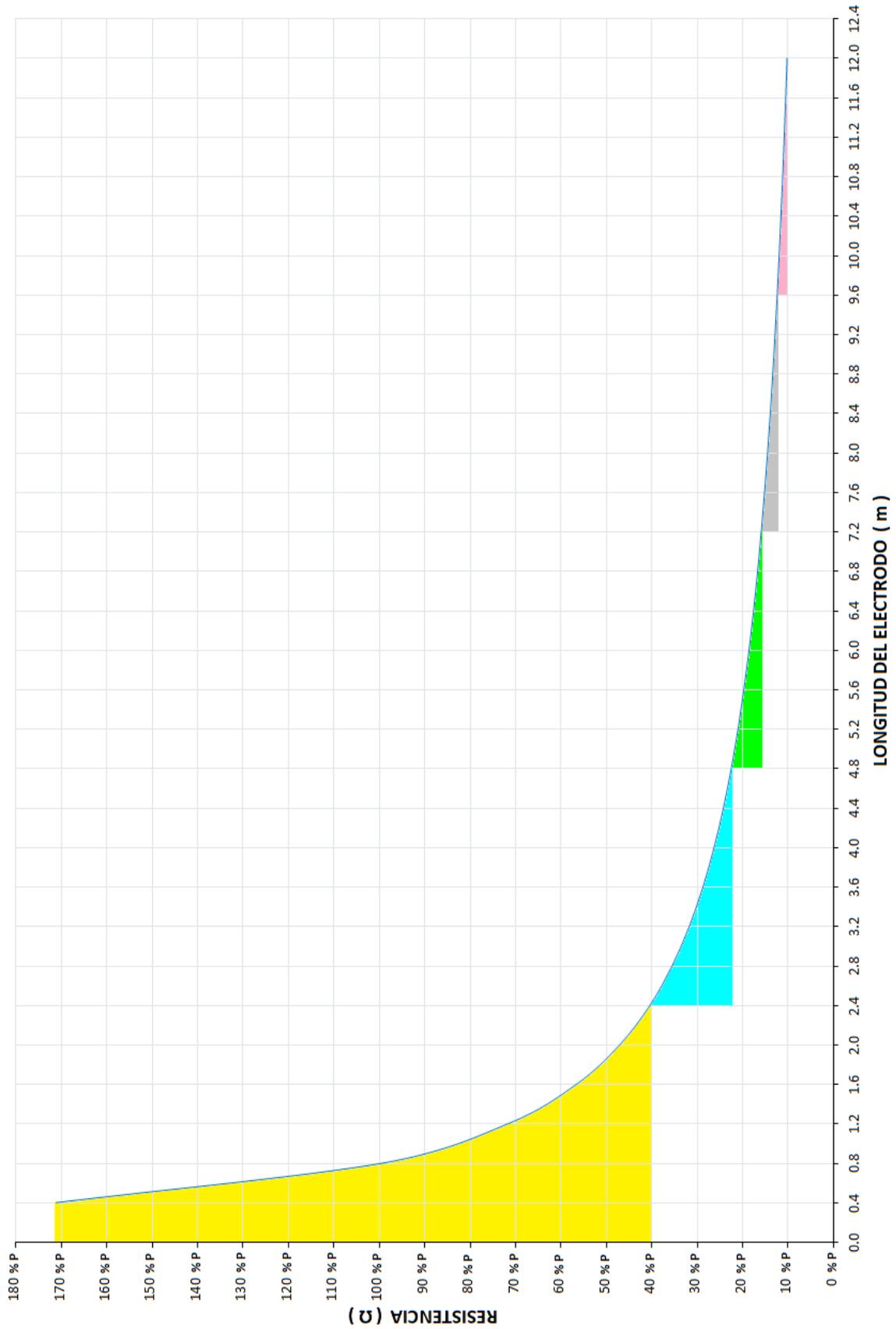
Tabla 5.- Variación de la resistencia en función a la longitud del electrodo

Ítem	L (m)	d (m)	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	K (1/m)	R ( $\Omega$ )	variación de R( $\Omega$ )	variación % de R
1	0.4	0.0158	100 % $\rho$	1.713	171.33 % $\rho$		
2	0.8	0.0158	100 % $\rho$	0.995	99.45 % $\rho$	71.87 % $\rho$	41.95
3	1.2	0.0158	100 % $\rho$	0.717	71.68 % $\rho$	27.77 % $\rho$	27.93
4	1.6	0.0158	100 % $\rho$	0.566	56.62 % $\rho$	15.05 % $\rho$	21.01
5	2.0	0.0158	100 % $\rho$	0.471	47.07 % $\rho$	9.54 % $\rho$	16.86
6	2.4	0.0158	100 % $\rho$	0.404	40.43 % $\rho$	6.63 % $\rho$	14.10
7	2.8	0.0158	100 % $\rho$	0.355	35.53 % $\rho$	4.90 % $\rho$	12.12
8	3.2	0.0158	100 % $\rho$	0.318	31.75 % $\rho$	3.77 % $\rho$	10.63
9	3.6	0.0158	100 % $\rho$	0.288	28.75 % $\rho$	3.00 % $\rho$	9.47
10	4.0	0.0158	100 % $\rho$	0.263	26.29 % $\rho$	2.45 % $\rho$	8.54
11	4.4	0.0158	100 % $\rho$	0.242	24.24 % $\rho$	2.04 % $\rho$	7.78
12	4.8	0.0158	100 % $\rho$	0.225	22.51 % $\rho$	1.73 % $\rho$	7.14
13	5.2	0.0158	100 % $\rho$	0.210	21.03 % $\rho$	1.48 % $\rho$	6.60
14	5.6	0.0158	100 % $\rho$	0.197	19.73 % $\rho$	1.29 % $\rho$	6.14
15	6.0	0.0158	100 % $\rho$	0.186	18.60 % $\rho$	1.13 % $\rho$	5.74
16	6.4	0.0158	100 % $\rho$	0.176	17.6 % $\rho$	1.00 % $\rho$	5.39
17	6.8	0.0158	100 % $\rho$	0.167	16.70 % $\rho$	0.89 % $\rho$	5.08
18	7.2	0.0158	100 % $\rho$	0.159	15.90 % $\rho$	0.80 % $\rho$	4.80
19	7.6	0.0158	100 % $\rho$	0.152	15.18 % $\rho$	0.72 % $\rho$	4.55
20	8.0	0.0158	100 % $\rho$	0.145	14.52 % $\rho$	0.65 % $\rho$	4.33
21	8.4	0.0158	100 % $\rho$	0.139	13.92 % $\rho$	0.59 % $\rho$	4.13
22	8.8	0.0158	100 % $\rho$	0.134	13.37 % $\rho$	0.54 % $\rho$	3.94
23	9.2	0.0158	100 % $\rho$	0.129	12.87 % $\rho$	0.50 % $\rho$	3.77
24	9.6	0.0158	100 % $\rho$	0.124	12.40 % $\rho$	0.46 % $\rho$	3.62
25	10.0	0.0158	100 % $\rho$	0.120	11.97 % $\rho$	0.43 % $\rho$	3.48
26	10.4	0.0158	100 % $\rho$	0.116	11.57 % $\rho$	0.40 % $\rho$	3.34
27	10.8	0.0158	100 % $\rho$	0.112	11.20 % $\rho$	0.37 % $\rho$	3.22
28	11.2	0.0158	100 % $\rho$	0.109	10.85 % $\rho$	0.34 % $\rho$	3.11
29	11.6	0.0158	100 % $\rho$	0.105	10.52 % $\rho$	0.32 % $\rho$	3.00
30	12.0	0.0158	100 % $\rho$	0.102	10.22 % $\rho$	0.30 % $\rho$	2.91

Donde:

- L: longitud del electrodo (m)
- $\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ ) , para este caso es 100%  $\rho$
- $K : [ \ln(8L/d) - 1 ] / 2\pi L$
- R: Resistencia ( $\Omega$ )
- Variación de R ( $\Omega$ ): Diferencia entre la resistencia de un electrodo de longitud ( L+0.4 ) y la resistencia de un electrodo de longitud ( L)
- Variación % de R ( $\Omega$ ): Variación porcentual entre la resistencia de un electrodo de longitud ( L+0.4 ) y la resistencia de un electrodo de longitud ( L)

### 3. Gráfica de la longitud de un electrodo vs resistencia



Grafica 1.- Longitud del electrodo vs resistencia

4. Se puede observar lo siguiente:

Para una longitud de un electrodo de:

- 2.4 m tiene una resistencia de  $40.43 \% \rho \Omega$
- 4.8 m tiene una resistencia de  $22.51 \% \rho \Omega$ ,  
varía  $(40.43 - 22.51)/40.43 \times 100\% = 44.32\%$  respecto del de 2.4 m
- 7.2 m tiene una resistencia de  $15.90 \% \rho \Omega$ ,  
varía  $(22.51 - 15.90)/22.51 \times 100\% = 29.36\%$  respecto del 4.8 m
- 9.6 m tiene una resistencia de  $12.40 \% \rho \Omega$ ,  
varía  $(15.90 - 12.40)/15.90 \times 100\% = 22.01\%$  respecto del 7.2 m
- 9.6 m tiene una resistencia de  $10.22 \% \rho \Omega$ ,  
varía  $(12.40 - 10.22)/12.40 \times 100\% = 17.58\%$  respecto del 9.6 m

Con lo cual podemos concluir que usar un electrodo de 2.4 m reduce significativamente la resistencia a un valor de  $40.43\%$  respecto al valor numérico de la resistividad del terreno. Usar electrodos de mayor longitud a 2.4 m reduce la resistencia pero podría generar los siguientes inconvenientes:

- Económicamente ya no sería viable debido a que tiene un mayor costo al de 2.4 m
- No son tan comerciables
- Transportarlos podría generar dificultades
- A mayor profundidad la resistividad del terreno podría ser mayor y por ende la resistencia aumentaría a pesar de que el electro sea de mayor longitud.

## PRUEBA DE CAMPO

### 1. Condiciones generales:

- Lugar: AA HH María Idelsa C.28, Garatea – Nuevo Chimbote
- Equipo de medición: Teluometro
- Marca del Teluometro: Megabras
- Modelo: MTD – 20KWe
- Resistividad del Lugar donde se colocó el electrodo: 242.72  $\Omega$ .m
- Longitud que se enterró del electrodo (L) : 0.1 m a 1 m
- Diámetro del electrodo: 5/8"

### 2. Resultados de la resistividad

Tabla 6.- Resultados de la resistividad en campo

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )	Fw	$\rho(\Omega$ .m)
1	24/06/2018	09:08 am	26.1	9.07	236.73
2	24/06/2018	09:13 am	26.2	9.07	237.63
3	24/06/2018	09:18 am	26.0	9.07	235.82
4	24/06/2018	09:23 am	27.3	9.07	247.61
5	24/06/2018	09:28 am	27.1	9.07	245.80

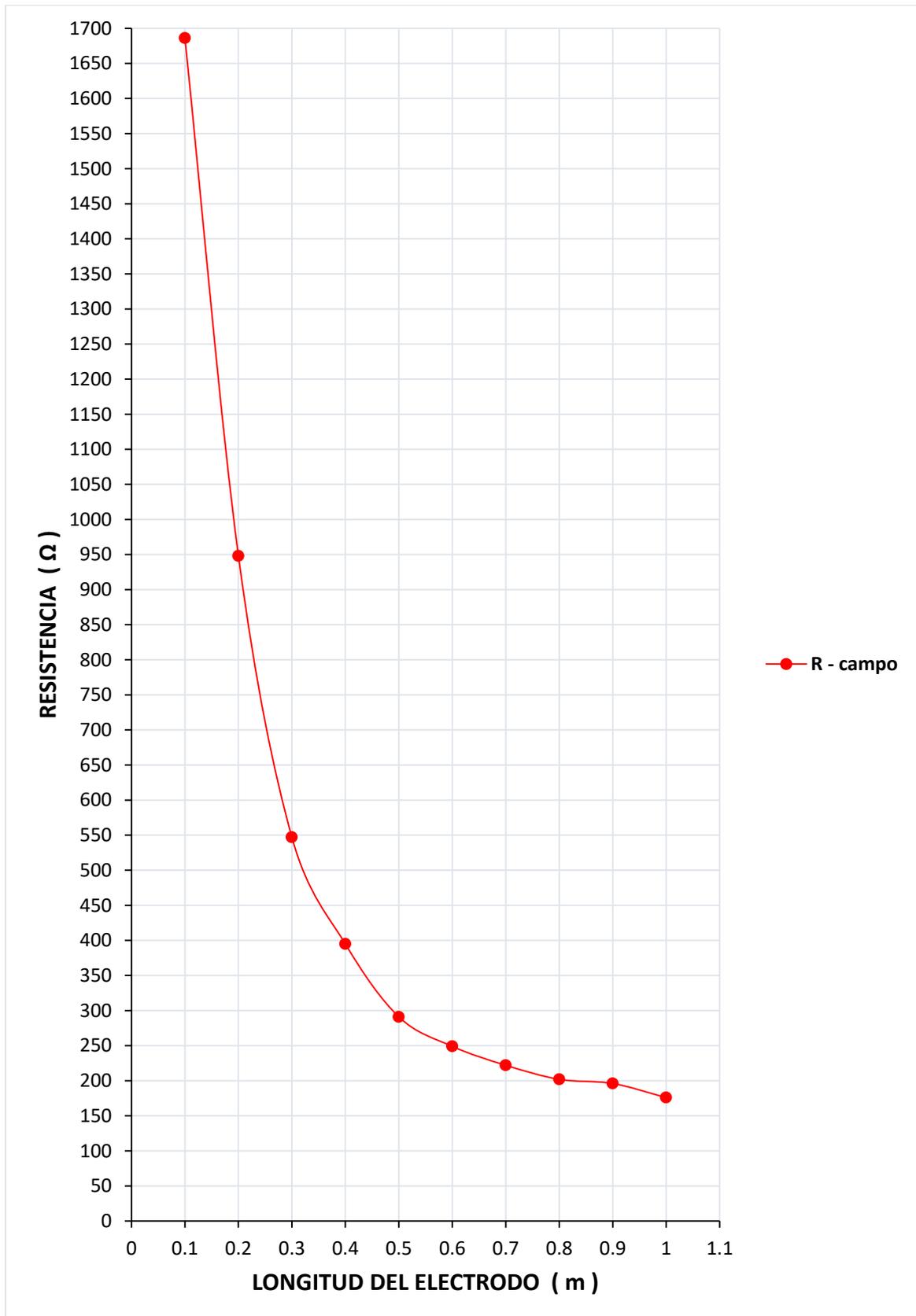
- 240.72  $\Omega$ .m es la resistividad final promedio de los 5 resultados

### 3. Resultado de la resistencia

Tabla 7.- Resultados de la resistencia en campo

Ítem	Fecha	Hora	L (m)	Resistencia en campo( $\Omega$ )
1	24/06/2018	10:02 am	0.1	1686
2	24/06/2018	10:04 am	0.2	948
3	24/06/2018	10:06 am	0.3	547
4	24/06/2018	10:08 am	0.4	395
5	24/06/2018	10:10 am	0.5	291
6	24/06/2018	10:12 am	0.6	249
7	24/06/2018	10:14 am	0.7	222
8	24/06/2018	10:16 am	0.8	202
9	24/06/2018	10:18 am	0.9	196
10	24/06/2018	10:20 am	1.0	176

### 3. Gráfica de longitud del electrodo vs resistencia en campo



Gráfica 2.- Longitud del electrodo vs resistencia en campo

## RESISTENCIA TEÓRICA

1. Conociendo la resistividad, L y d se puede hallar la resistencia teórica usando la fórmula de la resistencia:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

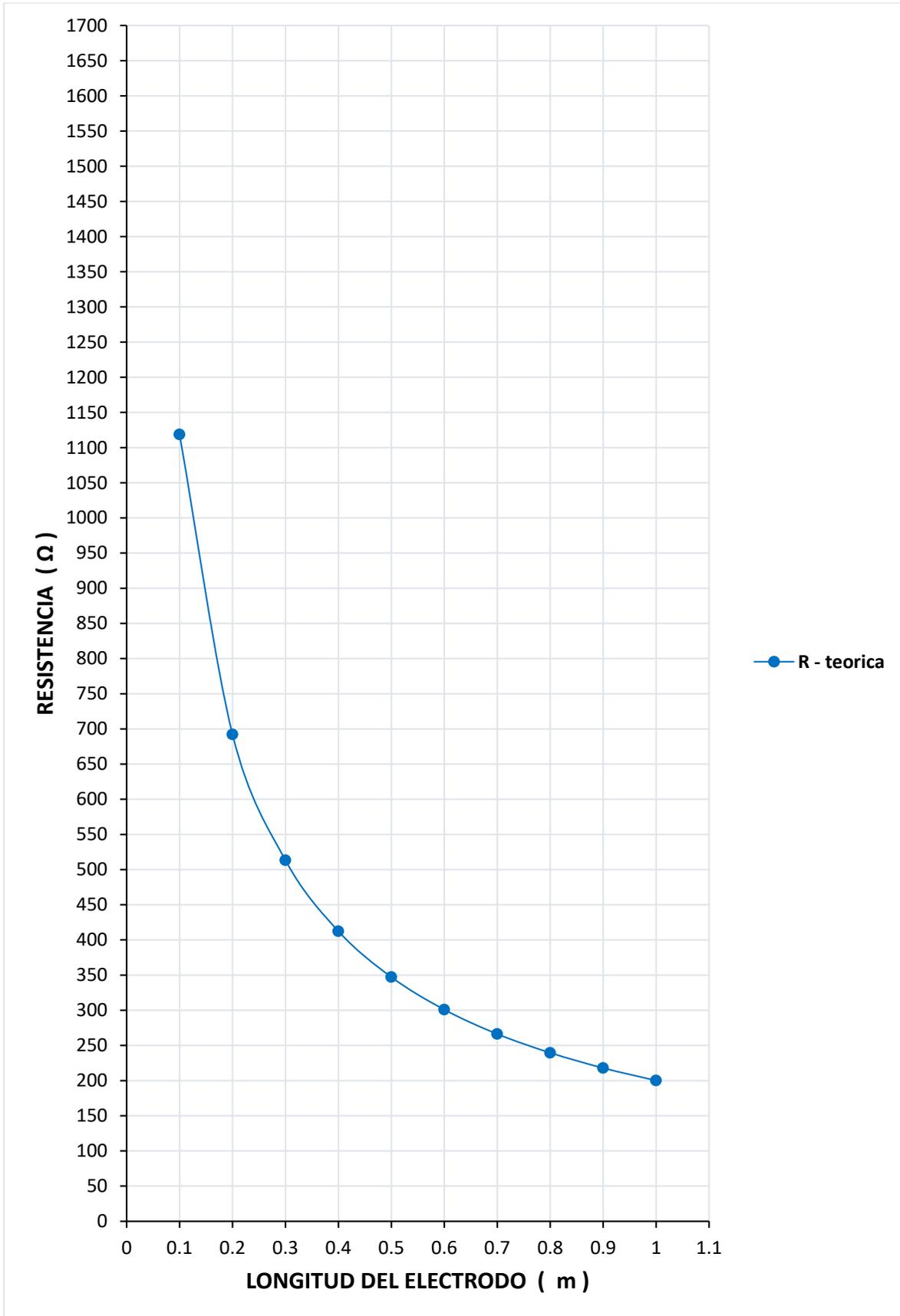
- R: Resistencia
- d: 5/8" (0.015875 m) Diámetro del electrodo
- L: 0.1 a 1.0 metros
- K :  $[\ln (8L/d) - 1] / 2\pi L$
- $\rho$ : 240.72  $\Omega$ .m

2. Resultados de la resistencia

Tabla 8.- Resultados de la resistencia teórica

Ítem	Resistividad ( $\Omega$ .m)	d (m)	L (m)	K (1 /m )	Resistencia Teórica ( $\Omega$ )
1	240.72	0.0158	0.1	4.647	1118.63
2	240.72	0.0158	0.2	2.875	692.07
3	240.72	0.0158	0.3	2.132	513.22
4	240.72	0.0158	0.4	1.713	412.35
5	240.72	0.0158	0.5	1.442	347.12
6	240.72	0.0158	0.6	1.250	300.90
7	240.72	0.0158	0.7	1.106	266.24
8	240.72	0.0158	0.8	0.995	239.52
9	240.72	0.0158	0.9	0.905	217.85
10	240.72	0.0158	1.0	0.831	200.04

3. Gráfica de la longitud del electrodo vs resistencia teórica.



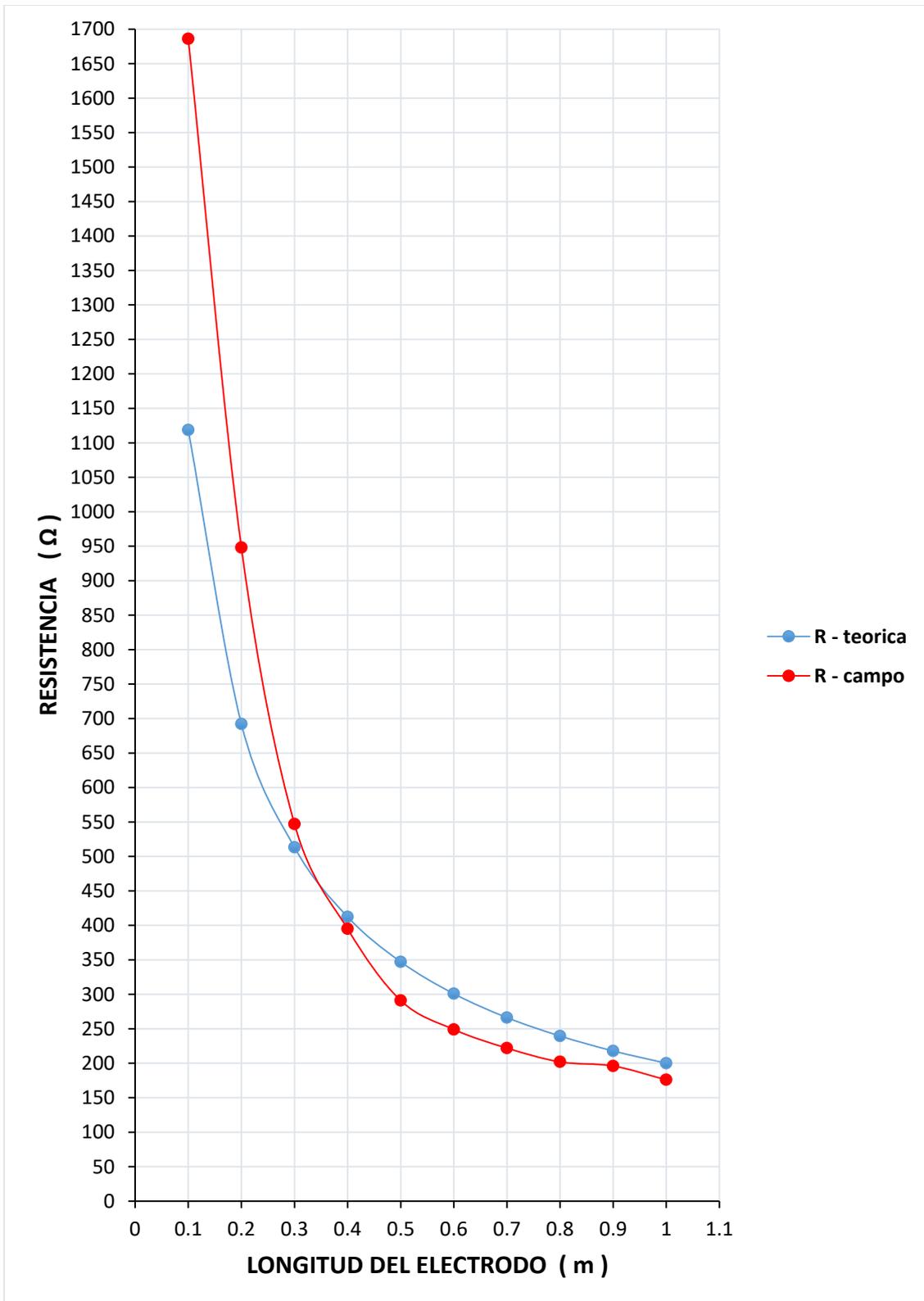
Gráfica 3.- Longitud del electrodo vs resistencia teórica

#### 4. Comparando la resistencia teórica y la resistencia en campo

Tabla 9.- Comparando la resistencia teórica y la resistencia de campo

<b>L (m)</b>	<b>Rt :Resistencia Teórica (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Rc :Resistencia en campo (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Diferencia entre Rt y Rc (<math>\Omega</math>)</b>	<b>% Diferencia entre Rt y Rc</b>
0.1	1118.63	1686	567.37	50.72
0.2	692.07	948	255.93	36.98
0.3	513.22	547	33.78	6.58
0.4	412.35	395	-17.35	4.21
0.5	347.12	291	-56.12	16.17
0.6	300.90	249	-51.9	17.25
0.7	266.24	222	-44.24	16.62
0.8	239.52	202	-37.52	15.66
0.9	217.85	196	-21.85	10.03
1	200.04	176	-24.04	12.02

5. Gráfica de la longitud del electrodo vs resistencia teórica y la resistencia en campo



Gráfica 4.- Longitud del electrodo vs resistencia teórica y la resistencia en campo

- Para una longitud  $L$  igual a 0.1 m se observa que la resistencia teórica es 1118.63  $\Omega$  y la resistencia en campo es 1686  $\Omega$ , lo cual es una diferencia de 567.37  $\Omega$  y porcentualmente es una diferencia de 50.72%. Pero a medida que la longitud del electrodo aumenta esta diferencia porcentual disminuye, en este caso cuando  $L$  es 1.0 la diferencia porcentual es 12.02%
- Se puede observar que a medida que  $L$  aumenta, la gráfica de la resistencia de los valores tomados en campo tienden a parecerse a la gráfica de la resistencia teórica.

## 4.2 REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AÑADIENDO

### CEMENTO CONDUCTIVO ALREDEDOR DEL ELECTRODO.

#### 1. Análisis del cemento conductivo como un electrodo.

En la IEEE 80 se hace mención a los electrodos con cemento conductivo.

En la cual indica la posibilidad que la fórmula de uso general para un electrodo:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

Puede estar relacionada con la resistencia del PAT que contiene cemento conductivo alrededor del Electrodo. Para ello se hace el siguiente análisis:

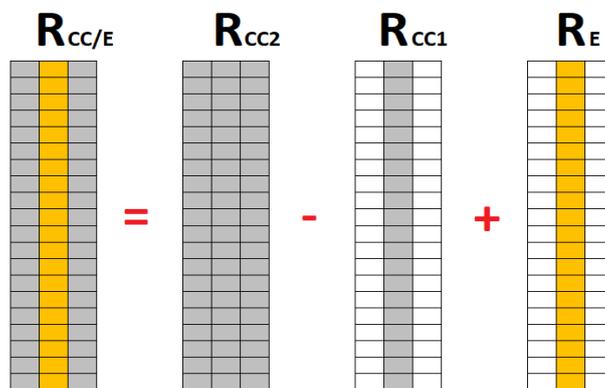


Figura 22.- Cemento conductivo analizado como electrodo.

Fuente: autoría propia

Donde:

- ✓  $R_{cc-E}$ : Resistencia del PAT que contiene cemento conductivo alrededor del electrodo.
- ✓  $R_{cc2}$ : Resistencia del PAT que solo contiene Cemento Conductivo.  
 $R_{cc2} = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{D_{cc}} \right) - 1 \right] / 2\pi L$
- ✓  $R_{cc1}$ : Resistencia del PAT cuando contiene Cemento Conductivo en el lugar que se ubicaría el Electrodo  
 $R_{cc1} = \rho_c \left[ \ln \left( \frac{8L}{D_{cc}} \right) - 1 \right] / 2\pi L$
- ✓  $R_E$ : Resistencia del PAT cuando contiene un Electrodo.  
 $R_E = \rho_c \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$

Donde:

$\rho$ : Resistividad del terreno

$\rho_c$ : Resistividad del cemento conductivo

L: Longitud del electrodo

Dcc: Diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo

d: Diámetro del electrodo

## 2. Desarrollando la fórmula de la resistencia de uso general para un electrodo

- $R_{cc-E} = R_{cc2} - R_{cc1} + R_E$
- $R_{cc-E} = \rho [ \ln(8L/D_{cc}) - 1 ] / 2\pi L - \rho_c [ \ln(8L/D_{cc}) - 1 ] / 2\pi L + \rho_c [ \ln(8L/d) - 1 ] / 2\pi L$
- $R_{cc-E} = \rho [ \ln(8L/D_{cc}) - 1 ] / 2\pi L + \rho_c [ \ln(D_{cc}/d) ] / 2\pi L$

Para poder entender el comportamiento de la resistencia del PAT que contiene cemento conductivo alrededor del electrodo se analizara el valor de la Resistencia para cada diámetro del cemento conductivo, el cual se añade alrededor del electrodo.

Para ello analizaremos la fórmula:

$$R_{cc} - E = \rho [ \ln( 8L / D_{cc} ) - 1 ] / 2\pi L + \rho_c [ \ln( D_{cc} / d ) ] / 2\pi L$$

Donde:

- $K_{cc1} = [ \ln(8L/D_{cc}) - 1 ] / 2\pi L$
- $K_{cc2} = [ \ln(D_{cc}/d) ] / 2\pi L$
- $R_{cc-E} = \rho \times K_{cc1} + \rho_c \times K_{cc2}$
- $R_{cc1} = \rho \times K_{cc1}$
- $R_{cc2} = \rho_c \times K_{cc2}$
- $R_{cc-E} = R_{cc1} + R_{cc2}$

Donde:

- $K_{cc1}$ : cociente independiente de  $\rho$  pero que se multiplica con este para hallar la resistencia del PAT que contiene Cemento Conductivo alrededor del Electrodo. Se vuelve un valor numérico fijo si se conoce  $L$  y  $D_{cc}$
- $K_{cc2}$ : cociente independiente de  $\rho_c$  pero que se multiplica con este para hallar el valor de la diferencia entre la resistencia del electrodo y la resistencia del cemento conductivo que reemplaza al lugar del electrodo. Se vuelve un valor numérico fijo si se conoce  $D_{cc}$ ,  $d$  y  $L$
- $R_{cc1}$ : Resistencia del PAT que contiene Cemento Conductivo alrededor del Electrodo.
- $R_{cc2}$ : Diferencia entre la resistencia del electrodo y la resistencia del cemento conductivo que reemplaza al lugar del electrodo.

Manteniendo fijo los siguientes parámetros:

- Longitud del electrodo ( $L$ ) = 2.4 m
- Resistividad del cemento conductivo ( $\rho_c$ ) = 0.35  $\Omega \cdot m$
- Resistividad del terreno ( $\rho$ ) = 100%  $\rho \Omega \cdot m$
- Diámetro del electrodo ( $d$ ) = 0.015875 m
- Diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo ( $D_{cc}$ ) = [0.02 m – 0.4 m]

### 3. Variación de la resistencia en función al diámetro del cemento conductivo

Tabla 10.- Variación de la resistencia en función al diámetro del cemento conductivo

Ítem	Dcc (m)	kcc1 (1/m)	Rcc1(Ω)	kcc2 (1/m)	Rcc2(Ω)	Rcc1/Rcc-E (%)	Rcc2/Rcc-E (%)	Rcc-E(Ω)
1	0.02	0.389	38.906 % ρ	0.015	0.005 % ρ	99.986	0.014	38.912 % ρ
2	0.03	0.362	36.218 % ρ	0.042	0.015 % ρ	99.959	0.041	36.232 % ρ
3	0.04	0.343	34.310 % ρ	0.061	0.021 % ρ	99.938	0.062	34.331 % ρ
4	0.05	0.328	32.830 % ρ	0.076	0.027 % ρ	99.919	0.081	32.857 % ρ
5	0.06	0.316	31.621 % ρ	0.088	0.031 % ρ	99.903	0.097	31.652 % ρ
6	0.07	0.306	30.599 % ρ	0.098	0.034 % ρ	99.888	0.112	30.633 % ρ
7	0.08	0.297	29.713 % ρ	0.107	0.038 % ρ	99.874	0.126	29.751 % ρ
8	0.09	0.289	28.932 % ρ	0.115	0.040 % ρ	99.861	0.139	28.972 % ρ
9	0.1	0.282	28.233 % ρ	0.122	0.043 % ρ	99.849	0.151	28.276 % ρ
10	0.11	0.276	27.601 % ρ	0.128	0.045 % ρ	99.837	0.163	27.646 % ρ
11	0.12	0.27	27.024 % ρ	0.134	0.047 % ρ	99.827	0.173	27.071 % ρ
12	0.13	0.265	26.494 % ρ	0.139	0.049 % ρ	99.816	0.184	26.542 % ρ
13	0.14	0.26	26.002 % ρ	0.144	0.051 % ρ	99.806	0.194	26.053 % ρ
14	0.15	0.255	25.545 % ρ	0.149	0.052 % ρ	99.796	0.204	25.597 % ρ
15	0.16	0.251	25.117 % ρ	0.153	0.054 % ρ	99.787	0.213	25.170 % ρ
16	0.17	0.247	24.715 % ρ	0.157	0.055 % ρ	99.778	0.222	24.770 % ρ
17	0.18	0.243	24.336 % ρ	0.161	0.056 % ρ	99.769	0.231	24.392 % ρ
18	0.19	0.24	23.977 % ρ	0.165	0.058 % ρ	99.76	0.24	24.035 % ρ
19	0.2	0.236	23.637 % ρ	0.168	0.059 % ρ	99.752	0.248	23.696 % ρ
20	0.21	0.233	23.313 % ρ	0.171	0.060 % ρ	99.744	0.256	23.373 % ρ
21	0.22	0.23	23.005 % ρ	0.174	0.061 % ρ	99.735	0.265	23.066 % ρ
22	0.23	0.227	22.710 % ρ	0.177	0.062 % ρ	99.728	0.272	22.772 % ρ
23	0.24	0.224	22.428 % ρ	0.18	0.063 % ρ	99.72	0.28	22.491 % ρ
24	0.25	0.222	22.157 % ρ	0.183	0.064 % ρ	99.712	0.288	22.221 % ρ
25	0.26	0.219	21.897 % ρ	0.185	0.065 % ρ	99.705	0.295	21.962 % ρ
26	0.27	0.216	21.647 % ρ	0.188	0.066 % ρ	99.697	0.303	21.712 % ρ
27	0.28	0.214	21.406 % ρ	0.19	0.067 % ρ	99.69	0.31	21.472 % ρ
28	0.29	0.212	21.173 % ρ	0.193	0.067 % ρ	99.683	0.317	21.240 % ρ
29	0.3	0.209	20.948 % ρ	0.195	0.068 % ρ	99.675	0.325	21.016 % ρ
30	0.31	0.207	20.731 % ρ	0.197	0.069 % ρ	99.668	0.332	20.800 % ρ
31	0.32	0.205	20.520 % ρ	0.199	0.070 % ρ	99.661	0.339	20.590 % ρ
32	0.33	0.203	20.316 % ρ	0.201	0.070 % ρ	99.655	0.345	20.386 % ρ
33	0.34	0.201	20.118 % ρ	0.203	0.071 % ρ	99.648	0.352	20.189 % ρ
34	0.35	0.199	19.926 % ρ	0.205	0.072 % ρ	99.641	0.359	19.998 % ρ
35	0.36	0.197	19.739 % ρ	0.207	0.072 % ρ	99.634	0.366	19.811 % ρ
36	0.37	0.196	19.557 % ρ	0.209	0.073 % ρ	99.628	0.372	19.630 % ρ
37	0.38	0.194	19.380 % ρ	0.211	0.074 % ρ	99.621	0.379	19.454 % ρ
38	0.39	0.192	19.208 % ρ	0.212	0.074 % ρ	99.615	0.385	19.282 % ρ
39	0.40	0.19	19.040 % ρ	0.213	0.074 % ρ	99.608	0.391	19.115 % ρ

Donde:

- $D_{cc}$  (m): Diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo
- $k_{cc1}$  (1/m): cociente independiente de  $\rho$  pero que se multiplica con este para hallar la resistencia del PAT que contiene cemento conductor alrededor del Electrodo. Se vuelve un valor numérico fijo si se conoce  $L$  y  $D_{cc}$
- $R_{cc1}(\Omega)$ : Resistencia del PAT que contiene cemento conductor alrededor del Electrodo.
- $k_{cc2}$ (1/m): cociente independiente de  $\rho_c$  pero que se multiplica con este para hallar el valor de la diferencia entre la resistencia del electrodo y la resistencia del cemento conductor que reemplaza al lugar del electrodo. Se vuelve un valor numérico fijo si se conoce  $D_{cc}$ ,  $d$  y  $L$
- $R_{cc2}(\Omega)$ : Diferencia entre la resistencia del electrodo y la resistencia del cemento conductor que reemplaza al lugar del electrodo.
- $R_{cc-E}(\Omega)$ : Resistencia del PAT que contiene cemento conductor alrededor del electrodo.
- $R_{cc1}/R_{cc-E}$ : Relación porcentual de  $R_{cc1}$  y  $R_{cc-E}$
- $R_{cc2}/R_{cc-E}$ : Relación porcentual de  $R_{cc1}$  y  $R_{cc-E}$

Se observa que la resistencia del PAT que solo contiene cemento conductor ( $R_{cc2}$ ) alrededor del electrodo se asemeja en un 99% al valor que se obtendría si en vez de cemento conductor este fuera el electrodo ( $R_{cc-E}$ ).

Añadir cemento conductor alrededor del electrodo equivaldría a aumentar el diámetro del electrodo. Lo cual económicamente no es viable si este aumento del diámetro fuera del material de cobre.

## 2. Segundo análisis del cemento conductivo como un electrodo.

En el siguiente cuadro se analiza la variación de resistencia cuando varía el diámetro. En este caso se va a comparar con respecto al valor de la resistencia de una varilla de cobre de 5/8" (0.015875) de diámetro y 2.4 metros de longitud.

Tabla 11.- Variación de resistencia cuando varía el diámetro

Ítem	Dcc (m)	Rcc-E (Ω)	Variación de Rcc-E(Ω)	Variación % de Rcc-E	Variación acumulada % de Rcc-E
1	0.015875	40.438 % ρ			
2	0.02	38.912 % ρ	1.526 % ρ	3.77	3.77
3	0.03	36.232 % ρ	2.679 % ρ	6.89	10.66
4	0.04	34.331 % ρ	1.901 % ρ	5.25	15.91
5	0.05	32.857 % ρ	1.475 % ρ	4.3	20.2
6	0.06	31.652 % ρ	1.205 % ρ	3.67	23.87
7	0.07	30.633 % ρ	1.019 % ρ	3.22	27.09
8	0.08	29.751 % ρ	0.882 % ρ	2.88	29.97
9	0.09	28.972 % ρ	0.778 % ρ	2.62	32.58
10	0.1	28.276 % ρ	0.696 % ρ	2.4	34.99
11	0.11	27.646 % ρ	0.630 % ρ	2.23	37.22
12	0.12	27.071 % ρ	0.575 % ρ	2.08	39.3
13	0.13	26.542 % ρ	0.529 % ρ	1.95	41.25
14	0.14	26.053 % ρ	0.490 % ρ	1.85	43.09
15	0.15	25.597 % ρ	0.456 % ρ	1.75	44.84
16	0.16	25.170 % ρ	0.426 % ρ	1.67	46.51
17	0.17	24.770 % ρ	0.401 % ρ	1.59	48.1
18	0.18	24.392 % ρ	0.378 % ρ	1.52	49.63
19	0.19	24.035 % ρ	0.357 % ρ	1.46	51.09
20	0.2	23.696 % ρ	0.339 % ρ	1.41	52.5
21	0.21	23.373 % ρ	0.322 % ρ	1.36	53.86
22	0.22	23.066 % ρ	0.307 % ρ	1.32	55.18
23	0.23	22.772 % ρ	0.294 % ρ	1.27	56.45
24	0.24	22.491 % ρ	0.281 % ρ	1.24	57.69
25	0.25	22.221 % ρ	0.270 % ρ	1.2	58.89
26	0.26	21.962 % ρ	0.259 % ρ	1.17	60.05
27	0.27	21.712 % ρ	0.249 % ρ	1.14	61.19
28	0.28	21.472 % ρ	0.240 % ρ	1.11	62.29
29	0.29	21.240 % ρ	0.232 % ρ	1.08	63.37
30	0.3	21.016 % ρ	0.224 % ρ	1.05	64.43
31	0.31	20.800 % ρ	0.217 % ρ	1.03	65.46
32	0.32	20.590 % ρ	0.210 % ρ	1.01	66.47
33	0.33	20.386 % ρ	0.203 % ρ	0.99	67.46
34	0.34	20.189 % ρ	0.197 % ρ	0.97	68.42
35	0.35	19.998 % ρ	0.192 % ρ	0.95	69.37
36	0.36	19.811 % ρ	0.186 % ρ	0.93	70.3
37	0.37	19.630 % ρ	0.181 % ρ	0.91	71.22
38	0.38	19.454 % ρ	0.176 % ρ	0.9	72.12
39	0.39	19.282 % ρ	0.171 % ρ	0.88	72.99
40	0.40	19.115 % ρ	0.167 % ρ	0.86	73.86

Donde:

- $D_{cc}$  (m): Diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo
- $R_{cc-E}$  ( $\Omega$ ): Resistencia del PAT que contiene cemento conductor alrededor del electrodo.
- Variación de  $R_{cc-E}(\Omega)$ : Variación entre la resistencia de electrodo con cemento conductor de determinado diámetro con respecto a la resistencia de otro diámetro.
- Variación % de  $R_{cc-E}$ : Variación porcentual entre la resistencia de electrodo con cemento conductor de determinado diámetro con respecto a la resistencia de otro diámetro.
- Variación acumulada % de  $R_{cc-E}$ : Variación entre la resistencia de electrodo con cemento conductor de determinado diámetro con respecto a la resistencia de 40.438 %  $\rho$  generado por un electrodo de diámetro 0.015875 m

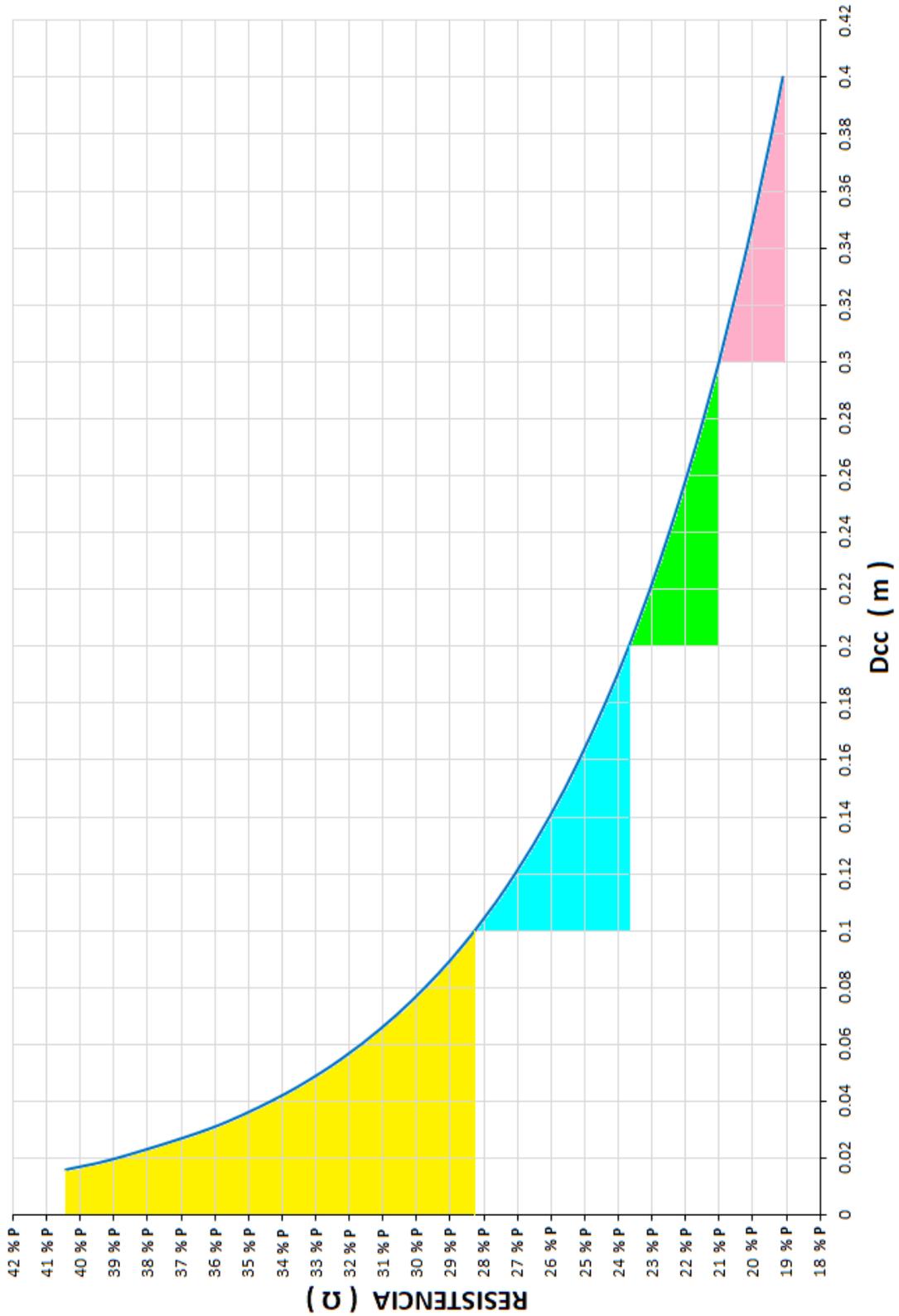
Se observa la variación de la resistencia cuando el electrodo tiene un diámetro de 4" (0.1 m), 8" (0.2 m), 12" (0.3 m) y 16" (0.4 m) de Cemento Conductor alrededor del electrodo (0.1 m aprox.) comparado con la resistencia del electrodo de 5/8" sin cemento conductor.

Para:

- 4" (0.1 m) varía 34.99%
- 8" (0.2 m) varía 52.5% y varía 17.51% ( $52.5\% - 34.99\% = 17.51\%$ ) respecto del de 4"
- 12" (0.3 m) varía 64.43% y varía 11.93% ( $64.43\% - 52.5\% = 11.93\%$ ) respecto del de 8"
- 16" (0.4 m) varía 73.87% y varía 9.44% ( $73.87\% - 64.43\% = 9.44\%$ ) respecto del de 12"

- ✓ Con lo cual podemos concluir que usar el electrodo con cemento conductivo de diámetro de 4" reduce de manera significativa (en este caso 34.99%) comparado con la resistencia del electrodo de 5/8" sin cemento conductivo.
- ✓ Usar electrodos con cemento conductivo de diámetros mayores a 4" reduce la resistencia pero ya no de manera significativa y por el contrario lo hace económicamente no viable debido a que se tendría que comprar mayores cantidades de cemento conductivo.

3. Gráfica del diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia



Gráfica 5.- Diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia.

## PRUEBA EN CAMPO:

### 1. Condiciones generales:

- Lugar: AA HH María Idelsa C.28, Garatea – Nuevo Chimbote
- Equipo de medición: Telurometro
- Marca del Telurometro: Megabras
- Modelo: MTD – 20KWe
- Resistividad del Lugar donde se colocó el electrodo con cemento conductivo: 240.72  $\Omega$ .m
- Resistividad del cemento conductivo Thor Cem : 0.35  $\Omega$ .m
- Longitud del electrodo: 1 m
- Diámetro del electrodo: 5/8"

### 2. Resultados en campo de la resistencia cuando se añade cemento conductivo al electrodo

Tabla 12.- Resultados del cemento conductivo en campo

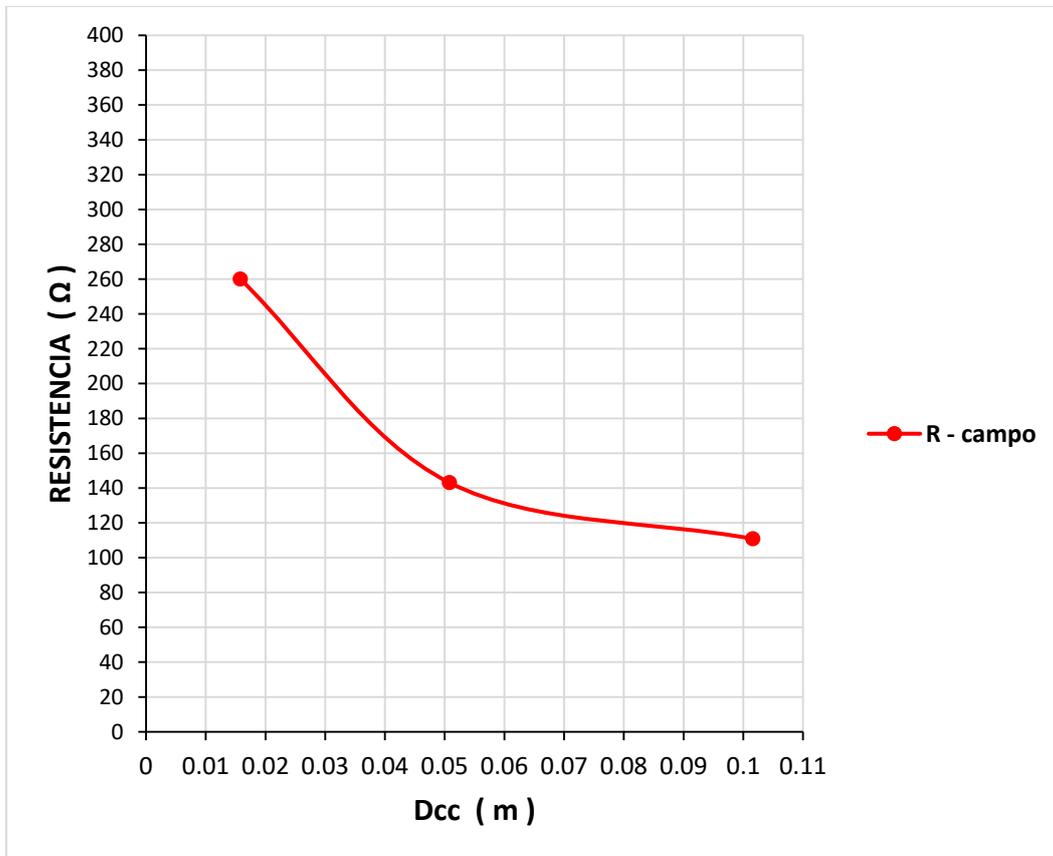
Ítem	Fecha	Hora	Muestra(m)	Resistencia( $\Omega$ )
1	03/07/2018	3:05 pm	Resistencia sin CC(5/8")	260
2	04/07/2018	10:13 am	CC de 2" (0.0508 m)	143.1
3	05/07/2018	10:16 am	CC de 4"(0.1016 m)	110.8

### 3. Comparando los resultados del cuadro anterior

Tabla 13.- Comparando los valores de resistencia de la tabla 10

Ítem	Dcc	Resistencia ( $\Omega$ )	Variación de R ( $\Omega$ )	Variación % de R	Variación acumulada % de R
1	Resistencia sin CC(5/8")	260			0
2	CC de 2" (0.0508 m)	143.1	116.9	44.96	44.96
3	CC de 4"(0.1016 m)	110.8	32.3	12.42	57.38

4. Gráfica de resultados en campo del diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia



Gráfica 6.- Diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia

## RESISTENCIA TEORICA

1. Conociendo la resistividad, L y d se puede hallar la resistencia teórica usando la fórmula de la resistencia para un electrodo con cemento conductivo:

$$R_{cc} - E = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{D_{cc}} \right) - 1 \right] / 2\pi L + \rho_c \left[ \ln \left( \frac{D_{cc}}{d} \right) \right] / 2\pi L$$

Donde:

- R: Resistencia
- Diámetro del electrodo con cemento conductivo (Dcc): 5/8" (0.015875 m)
- Diámetro del electrodo (d) : 5/8" (0.0158 m)
- Longitud del electrodo con cemento conductivo (L) : 1.0 metros

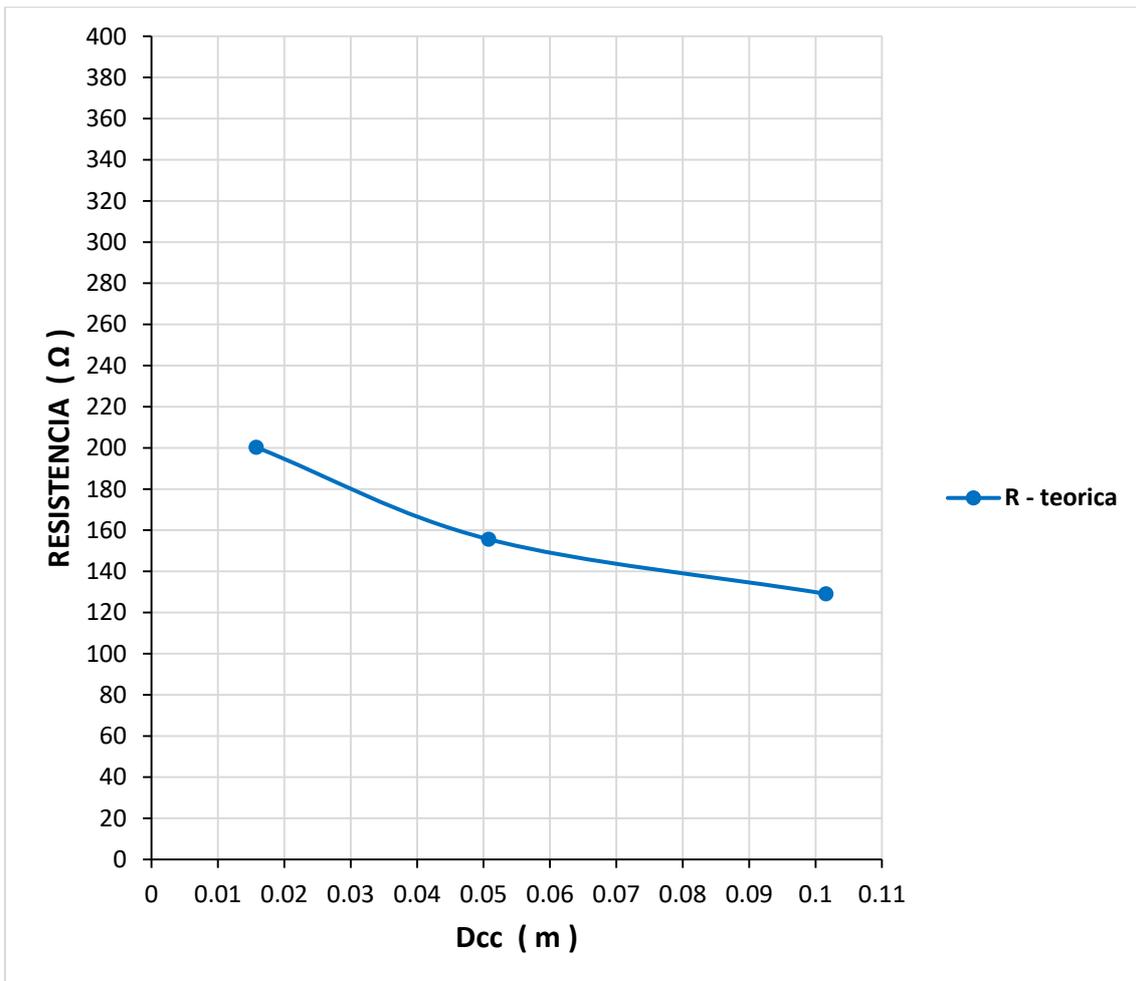
- Resistividad del terreno ( $\rho$ ): 240.72  $\Omega \cdot m$  (Esta prueba se hizo en el mismo terreno que la prueba de longitud de electrodo por ello se toma el mismo  $\rho$ )
- Resistividad del cemento conductor ( $\rho_c$ ): 0.35  $\Omega \cdot m$

## 2. Resultados de la resistencia teórica

Tabla 14.- Resultado de la resistencia teórica

Ítem	Dcc	d	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_c$ ( $\Omega \cdot m$ )	L (m)	Resistencia Teórica ( $\Omega$ )
1	5/8" (0.0158 m)	5/8" (0.0158 m)	240.72	0.35	1	200.26
2	2" (0.0508 m)	5/8" (0.0158 m)	240.72	0.35	1	155.58
3	4" (0.1016 m)	5/8" (0.0158 m)	240.72	0.35	1	129.06

## 3. Gráfica del diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo vs resistencia teórica



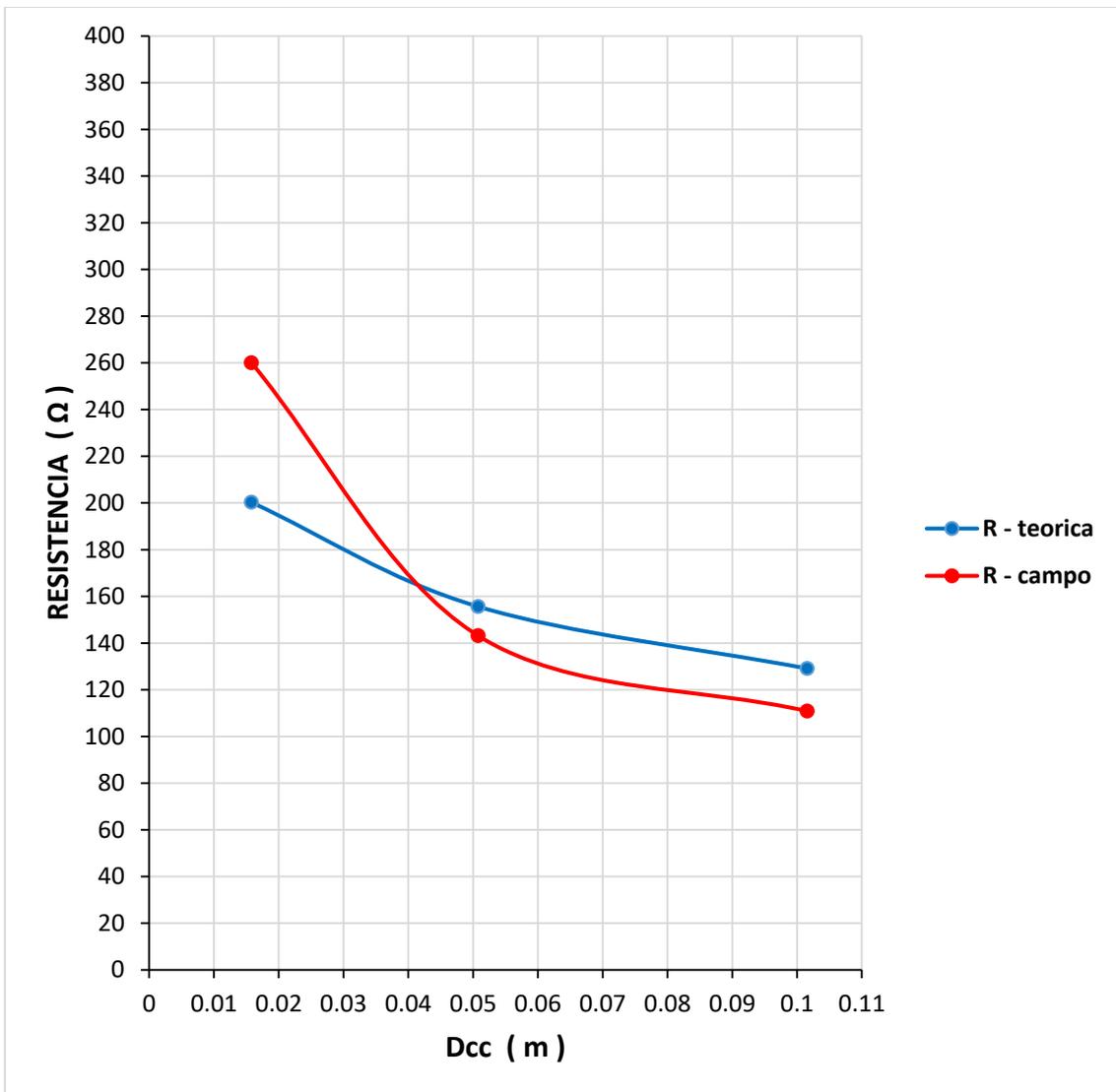
Gráfica 7.- Diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo vs resistencia teórica

4. Comparando la resistencia teórica y resistencia en campo

Tabla 15.- Comparando la resistencia teórica y resistencia en campo

Ítem	Diámetro	Rt: Resistencia teórica ( $\Omega$ )	Rc: Resistencia en campo ( $\Omega$ )	Diferencia entre Rt y Rc( $\Omega$ )	%Diferencia entre Rt y Rc
1	5/8" (0.0158 m)	200.26	260	59.74	22.98
2	2" (0.0508 m)	155.58	143.1	-12.48	8.72
3	4" (0.1016 m)	129.06	110.8	-18.26	16.48

5. Gráfica del diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia



Gráfica 8.- Diámetro del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo vs resistencia

- La primera de medida de resistencia a 1 m de profundidad del electrodo sin cemento conductor difieren entre sí en  $59.74 \Omega$  ( $260 \Omega - 200.26 \Omega$ ) esto puede deberse a que existen elementos, como las piedras, que aumentan la medida de la resistencia.
- Según cálculos teóricos la resistencia cuando el electrodo esta sin cemento conductor es  $200.26 \Omega$  y cuando este electrodo es revestido con cemento conductor (formando un cilindro alrededor del electrodo) es  $129.06 \Omega$  lográndose una reducción de  $71.20 \Omega$  lo cual representa una variación porcentual de 32.32%.
- Según los resultados tomados en campo la resistencia cuando el electrodo esta sin cemento conductor es  $260 \Omega$  y cuando este electrodo es revestido con cemento conductor es  $110.8 \Omega$  lográndose una reducción de  $149.2 \Omega$  lo cual representa una variación porcentual de 57.38%.

#### **4.3 REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AÑADIENDO BENTONITA AL TERRENO**

##### **PRUEBAS DE CAMPO**

Condiciones generales:

- Lugar: AA HH María Idelsa C.28, Garatea – Nuevo Chimbote
  - Equipo de medición: Teluometro
  - Marca del Teluro metro: Megabras
  - Modelo: MTD – 20KWe
  - Resistividad del Lugar:  $252.9 \Omega.m$
  - Longitud del electrodo: 1 m
  - Diámetro del electrodo: 5/8"
- ❖ Para hallar la resistencia se utilizara el método del 62%.
- ❖ Para hallar la resistividad se utilizara el método de Werner.

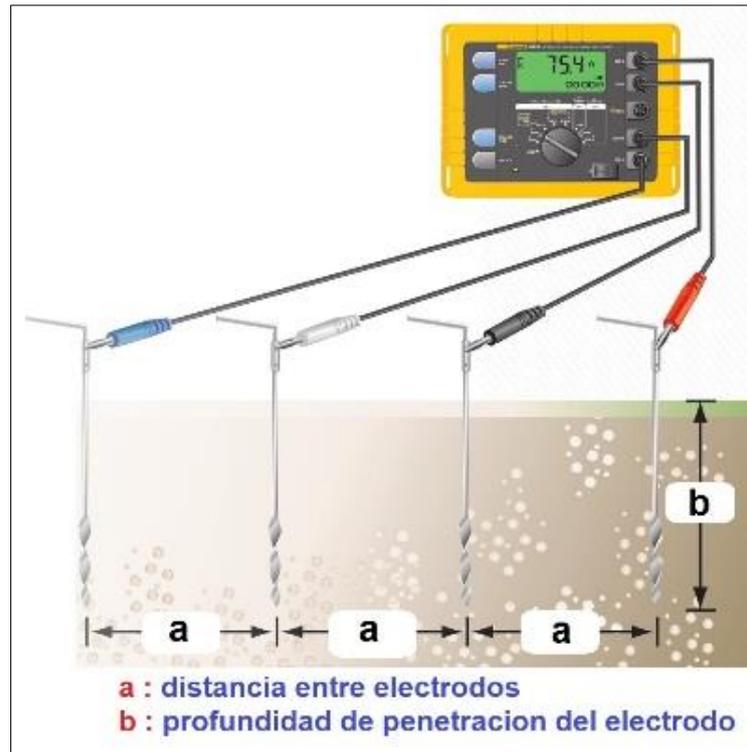


Figura 23.- Método de Werner.

Fuente: Resistencia de puesta a tierra, 2017

Para este método se usará la fórmula general del Método de Werner

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

Donde:

- $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
- R: valor indicado por el Teluómetro.
- a: 0.66 m de distancia de entre las jabalinas, expresada en metros.
- b: 0.3 m de profundidad de penetración de las jabalinas auxiliares.

## PRUEBA DE RESISTIVIDAD

### Descripción del desarrollo de las actividades:

- ✓ Para la instalación de Pozos a Tierra vertical de 1m x 1m x 3 m ( $3m^3$ ) se usa 02 bolsas de Bentonita la cual contiene 30 kg cada una. Para este experimento en campo se trabajó en un volumen de 1m x 2m x 0.5m ( $1m^3$ ). Por regla de 3 simple a  $1m^3$  de volumen le corresponde 20 kg de Bentonita.
- ✓ Para la medida de la Resistividad se usó el Método de Werner
- ✓ Se hicieron 4 pruebas de Resistividad en la cual se varía la cantidad de Bentonita por cada  $1m^3$  de volumen de tierra.
- ✓ Cada Prueba de Resistividad consta de 5 medidas de resistividad.
- ✓ Se trazaron líneas paralelas de 2 metros de largo y estas entre si están separadas a 0.25 m, es decir 1 metro de distancia entre la primera línea y la quinta línea). Como se aprecia en la figura x.
- ✓ En cada línea se instalaron las 4 picas auxiliares las cuales tuvieron una distancia entre ellas de 0.66 m, es decir 2 m de distancia entre la primera pica auxiliar y la última. Como se aprecia en la figura x.
- ✓ Para esta prueba de resistividad (excepto la primera) se diluyó por cada 1 kg de Bentonita en 2 litros de agua. Esto debido a que la función de la Bentonita es absorber agua en su interior y así mantener húmedo el Pozo a Tierra.

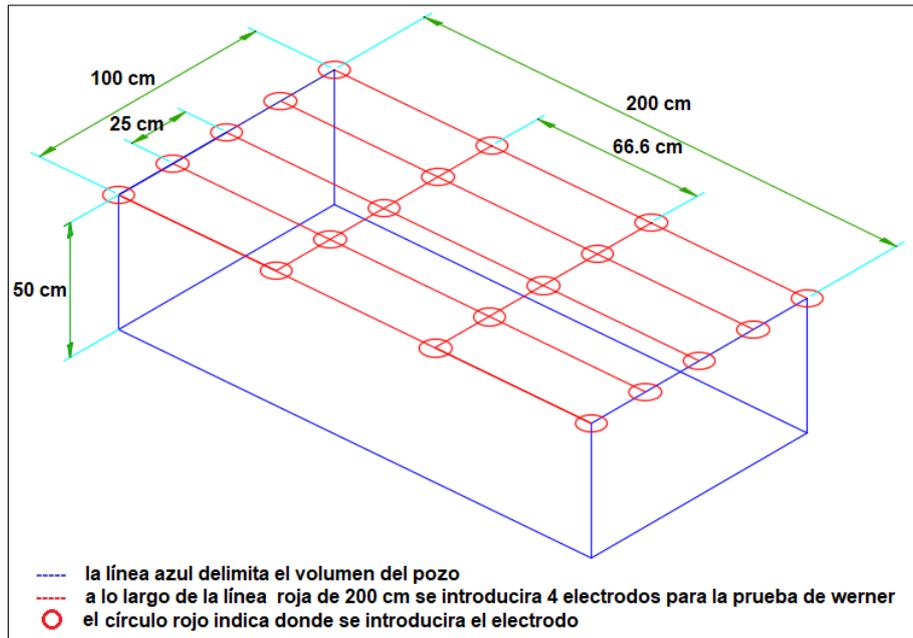


Figura 24.- Pozo de dimensiones de 2m x 1m x 0.5 m ( $1m^3$ ), en el cual se combinó la tierra con distintas cantidades de bentonita.

Fuente: autoría propia

1. Resultados de la Resistividad sin Bentonita.

Tabla 16.- Resistividad sin bentonita.

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega.m$ )
1	27/06/2018	7:52 a. m.	49.2	261.74
2	27/06/2018	7:54 a. m.	47.4	252.16
3	27/06/2018	7:56 a. m.	47.2	251.10
4	27/06/2018	7:58 a. m.	47.1	250.57
5	27/06/2018	8:00 a. m.	46.8	248.97

✓ 252.90  $\Omega.m$  es la resistividad final promedio de los 5 resultados.

2. Resultados de la resistividad con 20 Kg de bentonita en  $1m^3$  de tierra.

Tabla 17.- Resistividad con 20 Kg de bentonita.

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega.m$ )
1	27/06/2018	11:06 a. m.	35.20	187.26
2	27/06/2018	11:08 a. m.	29.40	156.41
3	27/06/2018	11:10 a. m.	26.20	139.38
4	27/06/2018	11:12 a. m.	30.70	163.32
5	27/06/2018	11:14 a. m.	31.80	169.18

✓ 163.11  $\Omega.m$  es la resistividad final promedio de los 5 resultados.

3. Resultados de la resistividad con 40 Kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 18.- Resistividad con 40 Kg de bentonita.

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ .m)
1	27/06/2018	2:25 p. m.	20.10	106.93
2	27/06/2018	2:27 p. m.	16.85	89.64
3	27/06/2018	2:29 p. m.	15.67	83.36
4	27/06/2018	2:31 p. m.	17.25	91.77
5	27/06/2018	2:33 p. m.	18.29	97.39

✓ 93.82  $\Omega$ .m es la resistividad final promedio de los 5 resultados.

4. Resultados de la resistividad con 60 Kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 19.- Resistividad con 60 Kg de bentonita.

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ .m)
1	27/06/2018	5:15 p. m.	16.55	88.05
2	27/06/2018	5:17 p. m.	14.15	75.28
3	27/06/2018	5:19 p. m.	12.83	68.26
4	27/06/2018	5:21 p. m.	15.20	80.86
5	27/06/2018	5:23 p. m.	17.72	94.27

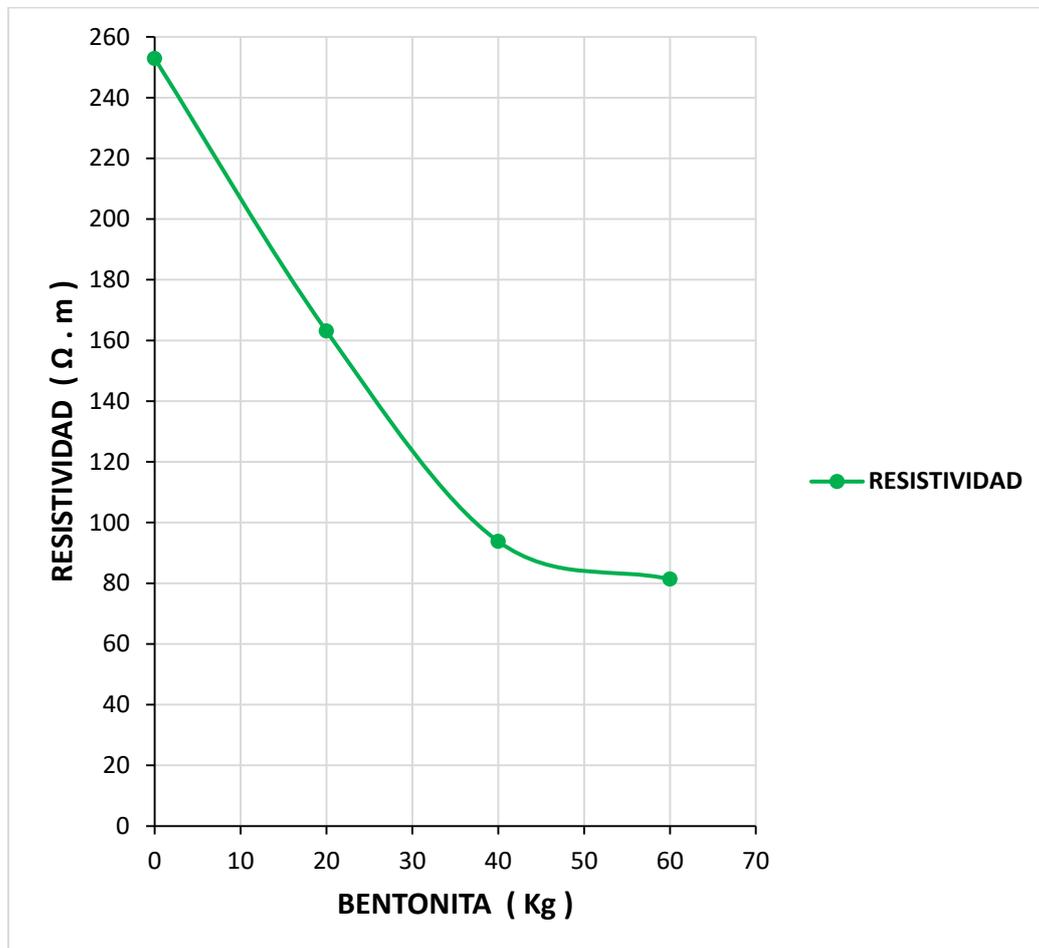
✓ 81.34  $\Omega$ .m es la resistividad final promedio de los 5 resultados.

5. Comparando los resultados finales de cada cuadro.

Tabla 20.- Resultados de las pruebas con cemento conductivo.

Ítem	Cantidad (kg de bentonita/m <sup>3</sup> de tierra)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	Variación de $\rho$ ( $\Omega$ .m)	Variación %	variación acumulada %
1	0	252.9			0
2	20	163.11	89.79	35.50	35.5
3	40	93.82	69.29	27.39	62.89
4	60	81.34	12.48	4.93	67.82

## 6. Gráfica de la cantidad de bentonita vs resistividad



Gráfica 9.- Bentonita vs resistividad

- ✓ La primera prueba de Resistividad es 252.9  $\Omega.m$  y nos sirve como referencia para poder determinar cuánto varía la resistividad cuando a 1m<sup>3</sup> de tierra se le añade 20 kg, 40 kg o 60 kg de Bentonita.
- ✓ Usar 40kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra en este experimento redujo la resistividad hasta 62.89%, lo cual es una reducción considerable.
- ✓ Usar más de 40 kg bentonita por cada de 1m<sup>3</sup> de tierra ya no reduce la resistividad de manera significativa, para este caso a 60 kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra redujo la resistividad en 4.93%. Además usar cantidades mayores de sal en un pozo a tierra podría corroer el electrodo y también podría ser económicamente no viable.

## PRUEBA DE RESISTENCIA

### Descripción del desarrollo de las actividades:

- ✓ Para la instalación de pozos a tierra vertical de 1 m x 1 m x 3 m ( $3\text{m}^3$ ) se usa una bolsa de bentonita la cual contiene 60 kg. Para este experimento en campo se trabajó en un volumen de 1 m x 2 m x 0.5 m ( $1\text{m}^3$ ). Por regla de 3 simple a  $1\text{m}^3$  de volumen le corresponde 20 kg de bentonita.
- ✓ Para la medida de la Resistencia se usó el Método del 62%.
- ✓ Se hicieron 4 pruebas de Resistencia en la cual se varía la cantidad de bentonita por cada  $1\text{m}^3$  de volumen de tierra.
- ✓ Cada Prueba de Resistencia consta de 1 medida de resistencia.
- ✓ Se plantó el electrodo de cobre a una profundidad de 0.5 m en el punto céntrico del pozo el cual tiene por dimensiones 1 m x 2 m x 0.5 m ( $1\text{m}^3$ ). Como se aprecia en la figura x
- ✓ La primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

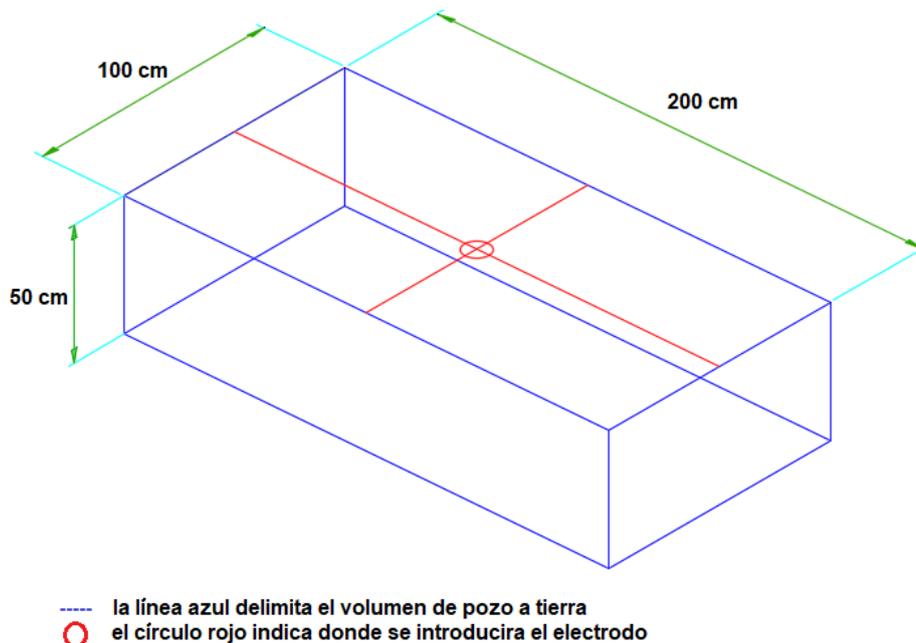


Figura 25.- Pozo de dimensiones de 2 m x 1 m x 0.5 m ( $1\text{m}^3$ ) en el cual se combinó la tierra con distintas cantidades de bentonita.

Fuente: autoría propia

1. Resultados de la resistencia sin bentonita

Tabla 21.- Resistencia sin bentonita

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	27/06/2018	8:05 a. m.	305

2. Resultados de la resistencia con 20 Kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 22.- Resistencia con 20 Kg de bentonita

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	27/06/2018	11:19 a. m.	107

3. Resultados de la resistencia con 40 Kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 23.- Resistencia con 40 Kg de bentonita

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	27/06/2018	2:38 pm.	81.4

4. Resultados de la resistencia con 60 Kg de bentonita en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 24.- Resistencia con 60 Kg de bentonita

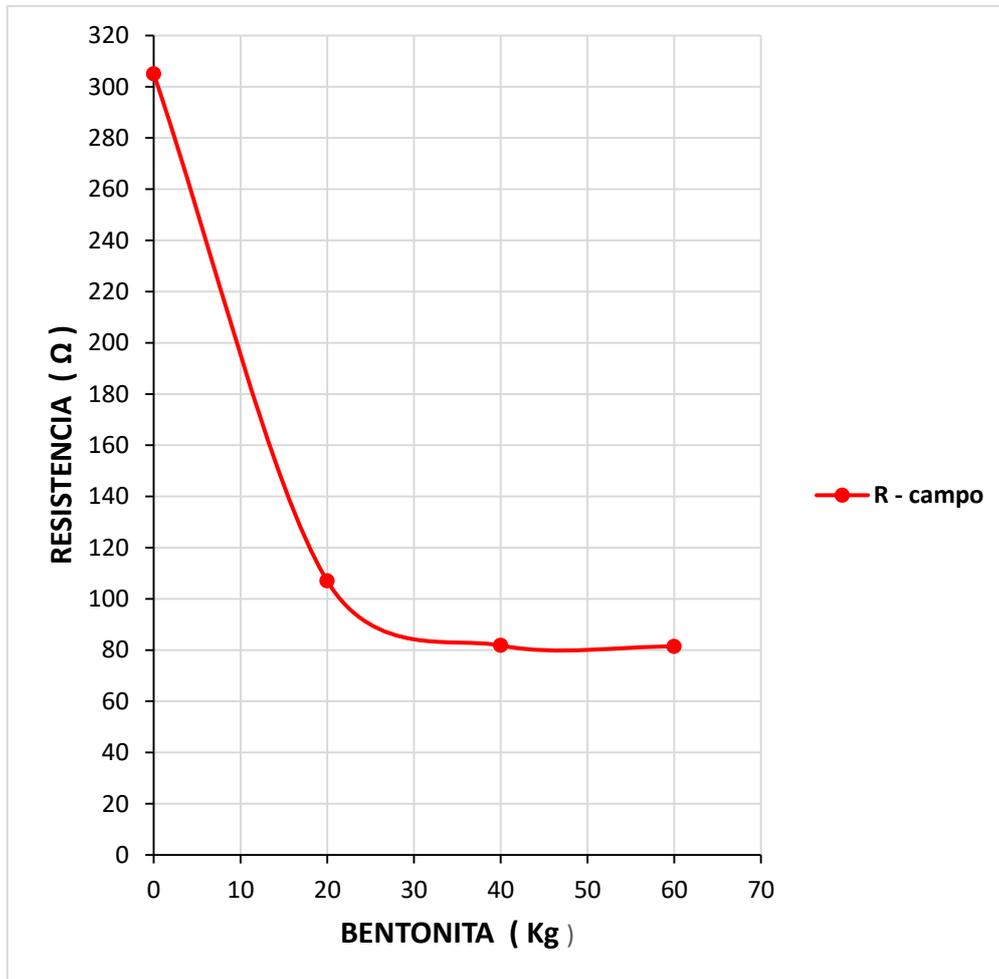
Ítem	Fecha	Hora	R ( $\Omega$ )
1	27/06/2018	5:28 pm	81.8

5. Comparando los resultados finales de cada cuadro:

Tabla 25.- Comparando los resultados de cada cuadro

Ítem	Cantidad (kg de bentonita/m <sup>3</sup> de tierra)	R( $\Omega$ )	Variación de R( $\Omega$ )	Variación %	variación acumulada %
1	0	305			0
2	20	107	198	64.91	64.91
3	40	81.8	25.2	8.26	73.17
4	60	81.4	0.4	0.13	73.30

## 6. Gráfica de la cantidad de bentonita vs resistencia en campo



Gráfica 10.- Bentonita vs resistencia en campo

- ✓ La primera prueba de resistencia es 305.0  $\Omega$  y nos sirve como referencia para poder determinar cuánto varía la resistividad cuando a 1m<sup>3</sup> de tierra se le añade 20 kg, 40 kg o 60 kg de bentonita
- ✓ Usar 20kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra en este experimento redujo la resistividad hasta 64.91%, lo cual es una reducción considerable.
- ✓ Usar más de 40 kg de bentonita por cada de 1m<sup>3</sup> de tierra ya no reduce la resistividad de manera significativa, para este caso a 40k de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra redujo la resistividad en 8.26% más y 60 kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> redujo la resistividad en 0.13%. Usar mayores cantidades de bentonita podría ser económicamente no viable.

## RESISTENCIA TEÓRICA

Se utiliza la siguiente formula:

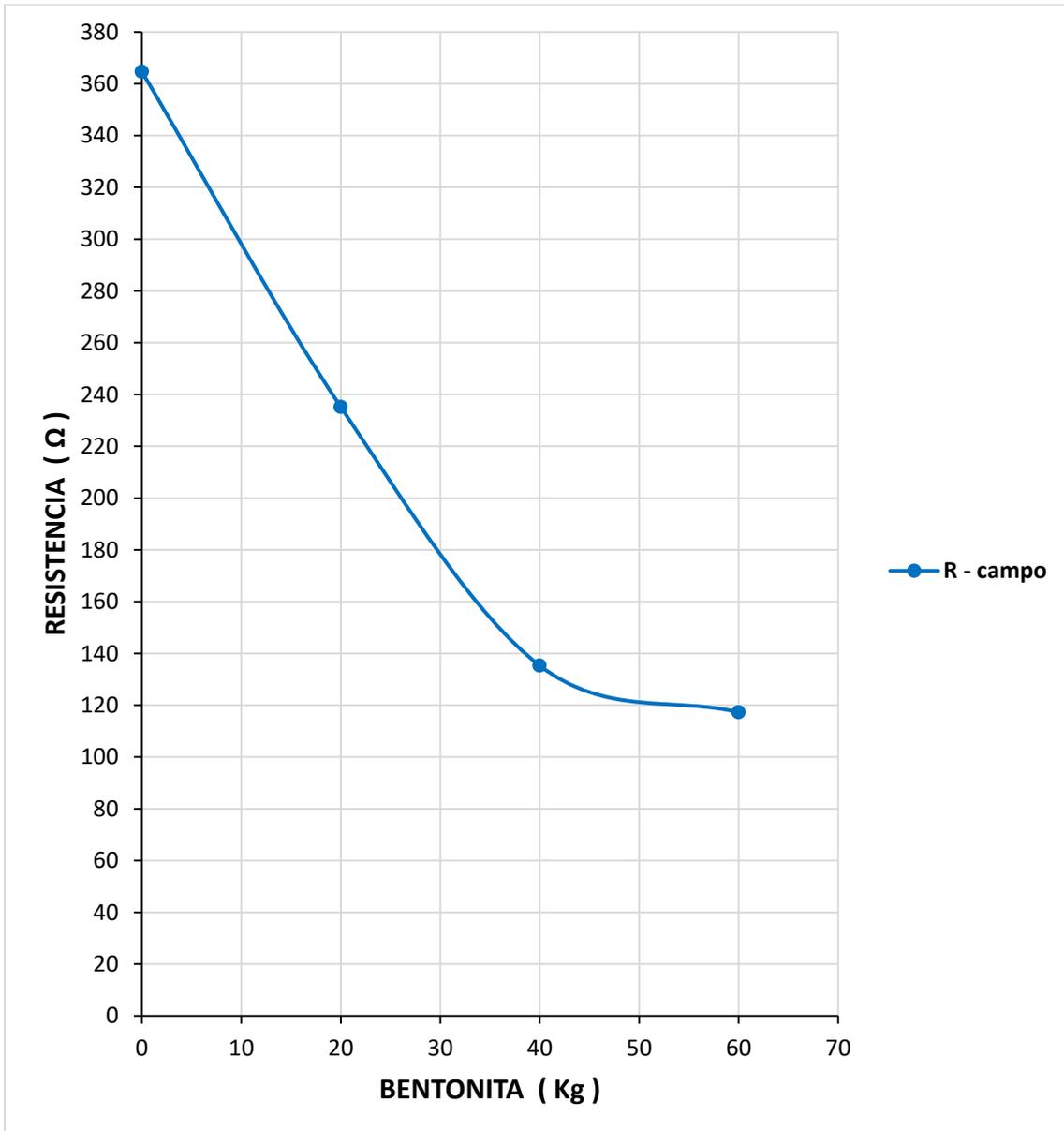
$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

- ✓ R: Resistencia teórica
- ✓  $\rho$ : Resistividad en campo
- ✓ Longitud del electrodo plantado en el pozo (L): 0.5 metros
- ✓ Diámetro del electrodo(d): 5/8" (0.015875 m) Diámetro del electrodo

Tabla 26.- Resistencia teórica de la bentonita

Ítem	Cantidad (kg de bentonita/m <sup>3</sup> de tierra)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	L(m)	d(m)	R( $\Omega$ )
1	0	252.9	0.5	0.015875 m	364.65
2	20	163.1	0.5	0.015875 m	235.19
3	40	93.82	0.5	0.015875 m	135.28
4	60	81.34	0.5	0.015875 m	117.29

### 8. Gráfica de la cantidad de bentonita vs resistencia teórica



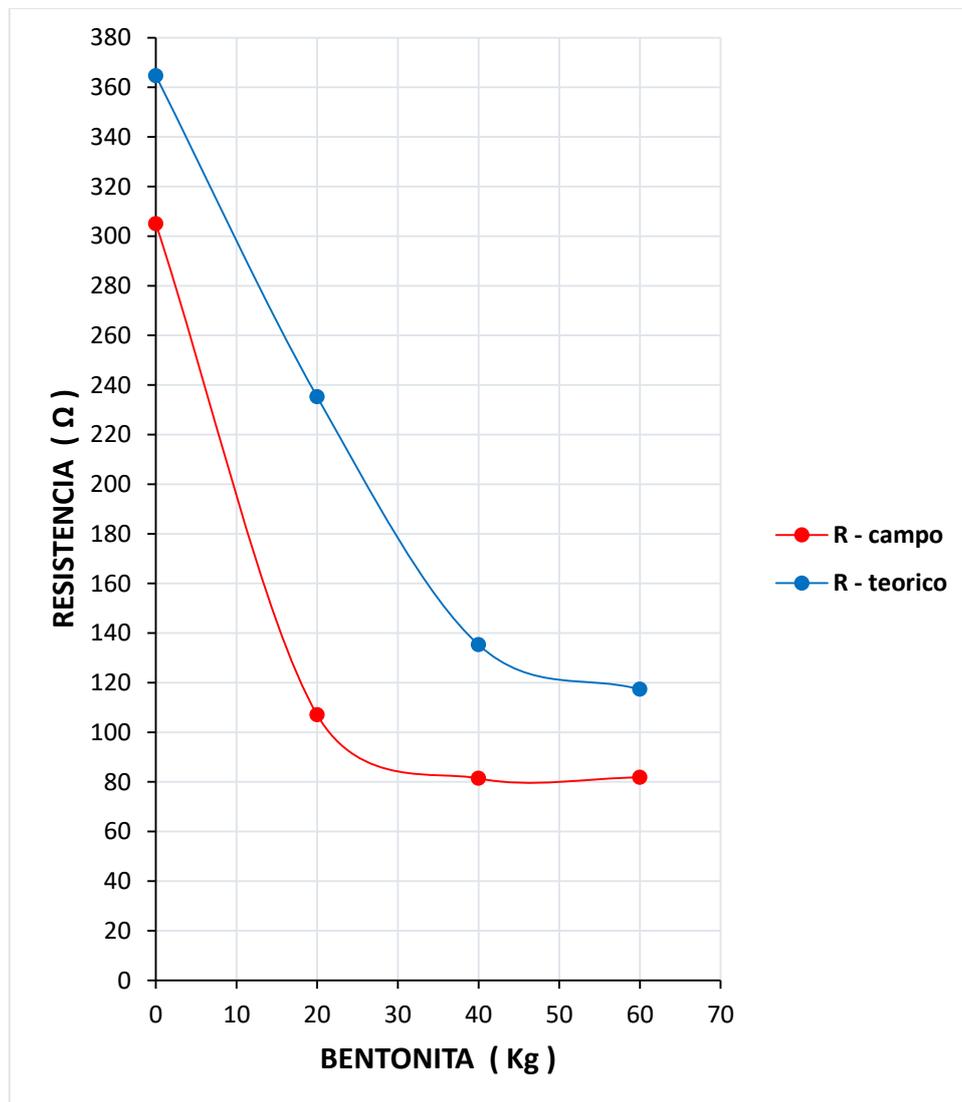
Gráfica 11.- Bentonita vs resistencia

### 3. Comparando la resistencia en campo y la resistencia teórica

Tabla 27.- Comparando la resistencia en campo y la resistencia teórica

Ítem	Cantidad (kg de bentonita/m <sup>3</sup> de tierra)	Rc: Resistencia en campo (Ω)	Rt : Resistencia Teórica (Ω)	Diferencia entre Rt y Rc (Ω)	% Diferencia entre Rt y Rc
1	0	305	364.65	59.65	16.35
2	20	107	235.19	128.19	54.50
3	40	81.4	135.28	53.88	39.82
4	60	81.8	117.29	35.49	30.25

4. Gráfica de la cantidad de bentonita vs resistencia teórica y resistencia en campo



Gráfica 12.- Bentonita vs resistencia teórica y la resistencia en campo

- ✓ Se observa que la resistencia en la primera medida tiene mayor valor numérico.
- ✓ En la segunda medida la resistencia disminuye considerablemente.
- ✓ En la tercera medida la resistencia sigue disminuyendo pero en menor proporción que la segunda medida.
- ✓ En la cuarta medida la resistencia casi no disminuye.

## 4.4 REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AÑADIENDO SAL INDUSTRIAL AL TERRENO

### PRUEBAS DE CAMPO

Condiciones generales:

- Lugar: AA HH María Idelsa C.28, Garatea – Nuevo Chimbote
  - Equipo de medición: Teluometro
  - Marca del Teluro metro: Megabras
  - Modelo: MTD – 20KWe
  - Resistividad del Lugar: 191  $\Omega$ .m
  - Longitud del electrodo: 1 m
  - Diámetro del electrodo: 5/8"
- ❖ Para hallar la resistencia se utilizara el método del 62%.
- ❖ Para hallar la resistividad se utilizara el método de Werner.

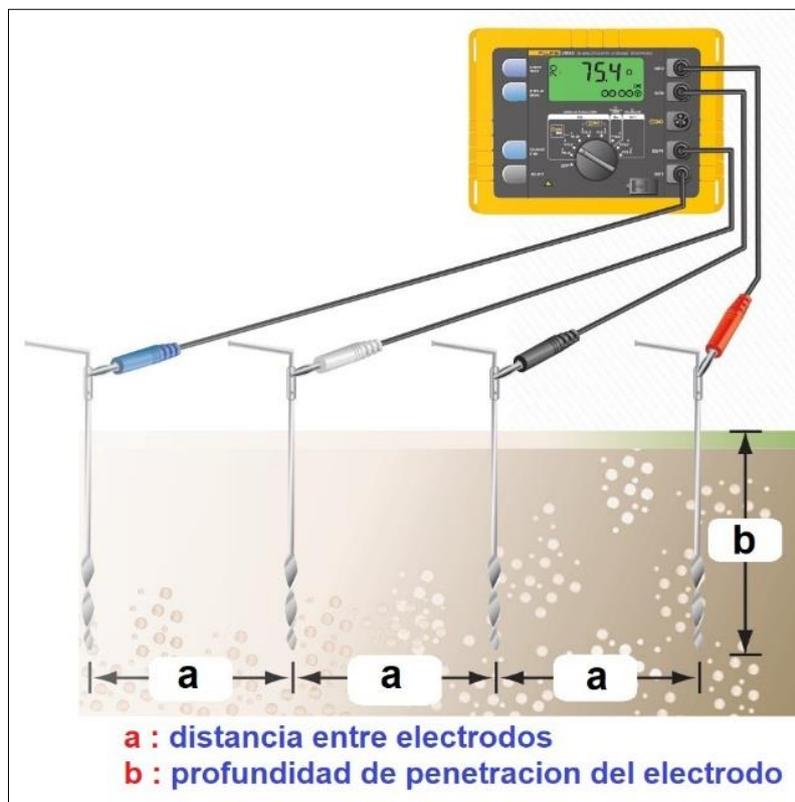


Figura 26.- Método de Werner.

Fuente: Resistencia de puesta a tierra, 2017

Para este método se usara la formula general del Método de Werner

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

Donde:

- ✓  $\rho a$ : valor de la resistividad media del terreno.
- ✓ R: valor indicado por el Teluometro.
- ✓ a: 0.66 m de distancia de entre las picas auxiliares, expresada en metros.
- ✓ b: 0.3 m de profundidad de penetración de las jabalinas auxiliares.

## **PRUEBA DE RESISTIVIDAD**

### **Descripción del desarrollo de las actividades**

- ✓ Para la instalación de pozos a tierra vertical de 1 m x 1 m x 3 m (3m<sup>3</sup>) se usa 02 bolsas de Sal Industrial la cual contiene 50 kg cada una (100 kg en total) Para este experimento en campo se trabajó en un volumen de 1 m x 2 m x 0.5 m (1m<sup>3</sup>). Si bien se suele utilizar 100 kg de sal por cada 3m<sup>3</sup> de tierra es decir 33.33 kg de sal/ 1m<sup>3</sup> de tierra, se mantuvo la proporción 20 kg de sal industrial por cada 1m<sup>3</sup> de tierra.
- ✓ Para la medida de la Resistividad se usó el Método de Werner
- ✓ Se hicieron 4 pruebas de Resistividad en la cual se varía la cantidad de Sal Industrial por cada 1m<sup>3</sup> de volumen de tierra.
- ✓ Cada Prueba de Resistividad consta de 5 medidas de resistividad.
- ✓ Se trazaron líneas paralelas de 2 metros de largo y estas entre si están separadas a 0.25 m, es decir 1 metro de distancia entre la primera línea y la quinta línea).
- ✓ En cada línea se instalaron las 4 picas auxiliares las cuales tuvieron una distancia entre ellas de 0.66 m, es decir 2 m de distancia entre la primera pica auxiliar y la última.

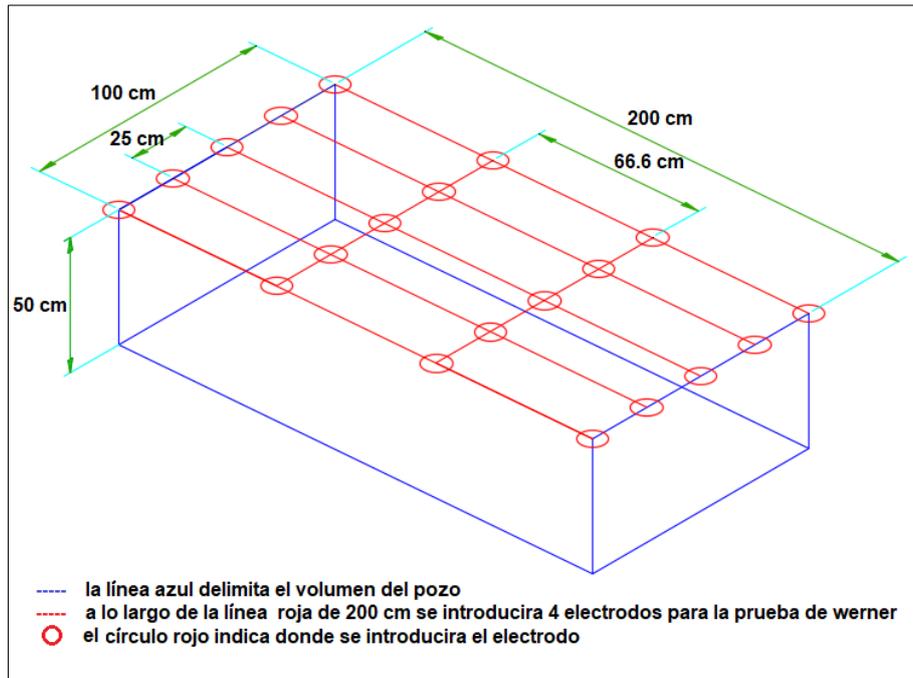


Figura 27.- Pozo de dimensiones de 2m x 1m x 0.5 m (1m<sup>3</sup>), en el cual se combinó la tierra con distintas cantidades de sal.

Fuente: autoría propia

1. Resultados de la resistividad sin sal industrial

Tabla 28.- Resistividad sin sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R (Ω)	ρ (Ω.m)
1	01/07/2018	8:10 a. m.	31.20	165.99
2	01/07/2018	8:12 a. m.	33.10	176.10
3	01/07/2018	8:14 a. m.	37.10	197.38
4	01/07/2018	8:16 a. m.	38.70	205.89
5	01/07/2018	8:18 a. m.	39.40	209.62

✓ 191.00 Ω.m es la resistividad final promedio de los 5 resultados.

2. Resultados de la resistividad con 20 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 29.- Resistividad con 20 Kg de sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R (Ω)	ρ (Ω.m)
1	01/07/2018	11:10 a. m.	20.30	108.0
2	01/07/2018	11:12 a. m.	15.39	81.9
3	01/07/2018	11:14 a. m.	17.41	92.6
4	01/07/2018	11:16 a. m.	20.20	107.5
5	01/07/2018	11:18 a. m.	23.40	124.5

✓ 102.90 Ω.m es la resistividad final promedio de los 5 resultados

3. Resultados de la resistividad con 40 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 30.- Resistividad con 40 Kg de sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ .m)
1	01/07/2018	14:17 pm	12.93	68.79
2	01/07/2018	14:19 pm	11.62	61.82
3	01/07/2018	14:21 pm	11.34	60.33
4	01/07/2018	14:23 pm	11.95	63.57
5	01/07/2018	14:25 pm	13.23	70.38

✓ 64.98  $\Omega$ .m es la resistividad final promedio de los 5 resultados

4. Resultados de la resistividad con 60 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra

Tabla 31.- Resistividad con 60 Kg de sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R ( $\Omega$ )	$\rho$ ( $\Omega$ .m)
1	01/07/2018	17:14 pm	11.78	62.67
2	01/07/2018	17:16 pm	10.79	57.40
3	01/07/2018	17:18 pm	10.09	53.68
4	01/07/2018	17:20 pm	10.79	57.40
5	01/07/2018	17:22 pm	12.29	65.38

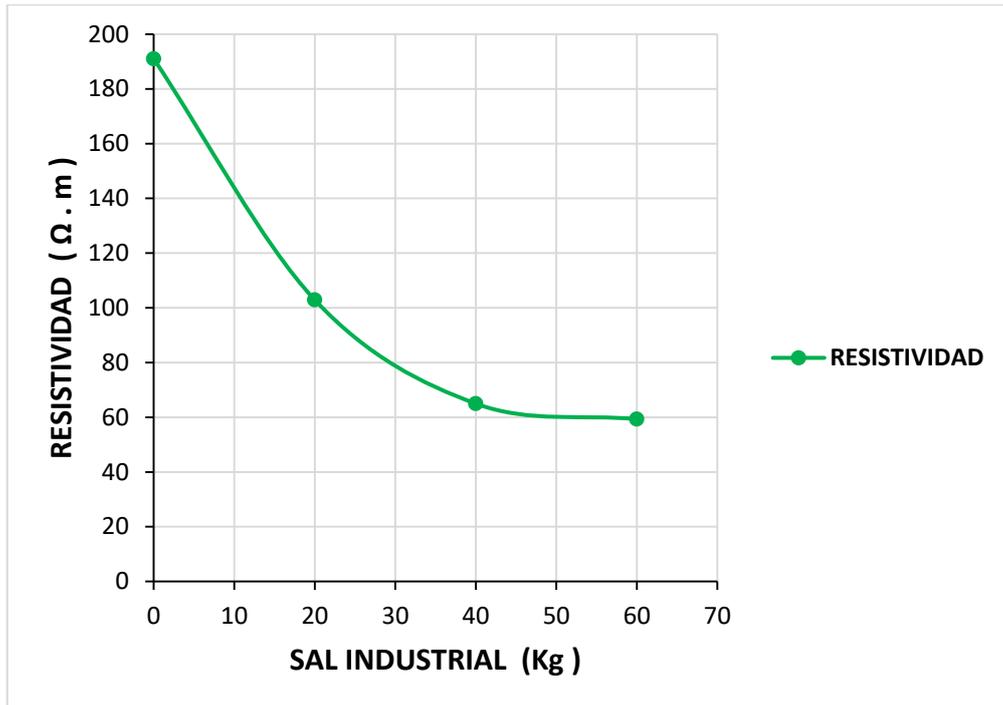
✓ 59.31  $\Omega$ .m es la resistividad final promedio de los 5 resultados

5. Comparando los resultados finales de cada cuadro:

Tabla 32.- Comparando los resultados de cada cuadro

Ítem	Cantidad (kg de sal/m <sup>3</sup> de tierra)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	Variación de $\rho$ ( $\Omega$ .m)	Variación %	variación acumulada %
1	0	191			0
2	20	102.9	88.1	46.13	46.13
3	40	64.98	37.92	19.85	65.98
4	60	59.31	5.67	2.97	68.95

## 6. Gráfica de la cantidad de sal industrial vs resistividad teórica



Gráfica 13.- Sal industrial vs resistividad

- ✓ La primera prueba de resistividad es 191.0  $\Omega.m$  y nos sirve como referencia para poder determinar cuánto varía la resistividad cuando a  $1m^3$  de tierra se le añade 20 kg, 40 kg o 60 kg de Sal Industrial.
- ✓ Usar 20 kg de sal industrial por cada  $1m^3$  de tierra (lo cual equivale a 60 kg de sal industrial por cada  $3m^3$  de tierra) en este experimento redujo la resistividad hasta 46.13%, lo cual es una reducción considerable.
- ✓ Usar 40 kg de sal industrial por cada de  $1m^3$  de tierra (lo cual equivale a 120 kg de sal industrial por cada  $3m^3$  de tierra) redujo la resistividad en 19.85% más.
- ✓ Los 100 kg de sal por cada  $3m^3$  de tierra que se suele usar de manera empírica y se aproxima a la cantidad de 120 kg de sal por cada  $3m^3$  según los cálculos realizado. Por lo tanto se recomienda seguir usando 02 bolsas de sal de 50 kg para un pozo a tierra de  $3m^3$  de volumen.
- ✓ 60 kg de sal por cada  $1m^3$  de tierra redujo la resistividad en 2.97%. Usar mayores cantidades de Sal Industrial podría ser económicamente no viable.

## PRUEBA DE RESISTENCIA

### Descripción del desarrollo de las actividades:

- ✓ Se tendrá como proporción 20 kg de sal industrial por cada  $1\text{m}^3$  de tierra.
- ✓ Para la medida de la Resistencia se usó el Método del 62%.
- ✓ Se hicieron 4 pruebas de Resistencia en la cual se varía la cantidad de Sal Industrial por cada  $1\text{m}^3$  de volumen de tierra.
- ✓ Cada Prueba de Resistencia consta de 1 medida de resistencia.
- ✓ Se plantó el electrodo de cobre a una profundidad de 50 cm en el punto céntrico del pozo el cual tiene por dimensiones  $1\text{m} \times 2\text{m} \times 0.5\text{m}$  ( $1\text{m}^3$ ).
- ✓ La primera pica auxiliar se instaló a 3.1 m (62% de 5 m) del electrodo y la segunda auxiliar se instaló a 5 m. El electrodo y las 2 picas auxiliares están en una misma dirección.

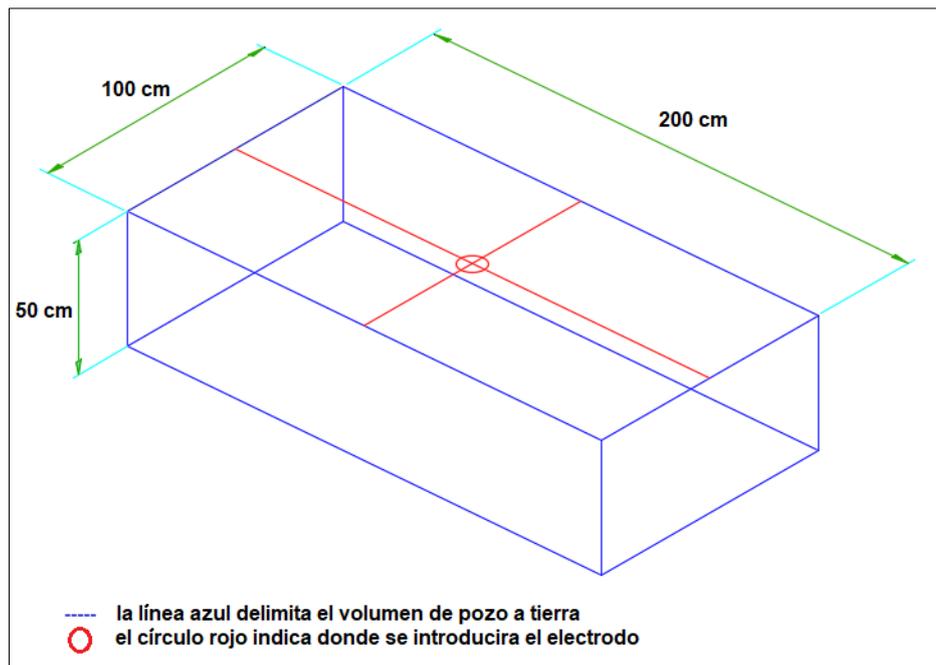


Figura 28.- Pozo de dimensiones de  $2\text{m} \times 1\text{m} \times 0.5\text{m}$  ( $1\text{m}^3$ ), en el cual se combinó la tierra con distintas cantidades de sal industrial.

Fuente: autoría propia

1. Resultados de la resistencia sin sal industrial.

Tabla 33.- Resistencia sin sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	01/07/2018	8:23 a. m.	326

2. Resultados de la resistencia con 20 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 34.- Resistencia con 20 Kg de sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	01/07/2018	11:23 a. m.	97.3

3. Resultados de la resistencia con 40 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 35.- Resistencia con 40 Kg de sal industrial

Ítem	Fecha	Hora	R( $\Omega$ )
1	01/07/2018	14:30 pm	68.7

4. Resultados de la resistencia con 60 Kg de sal industrial en 1m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 36.- Resistencia con 60 Kg de sal industrial

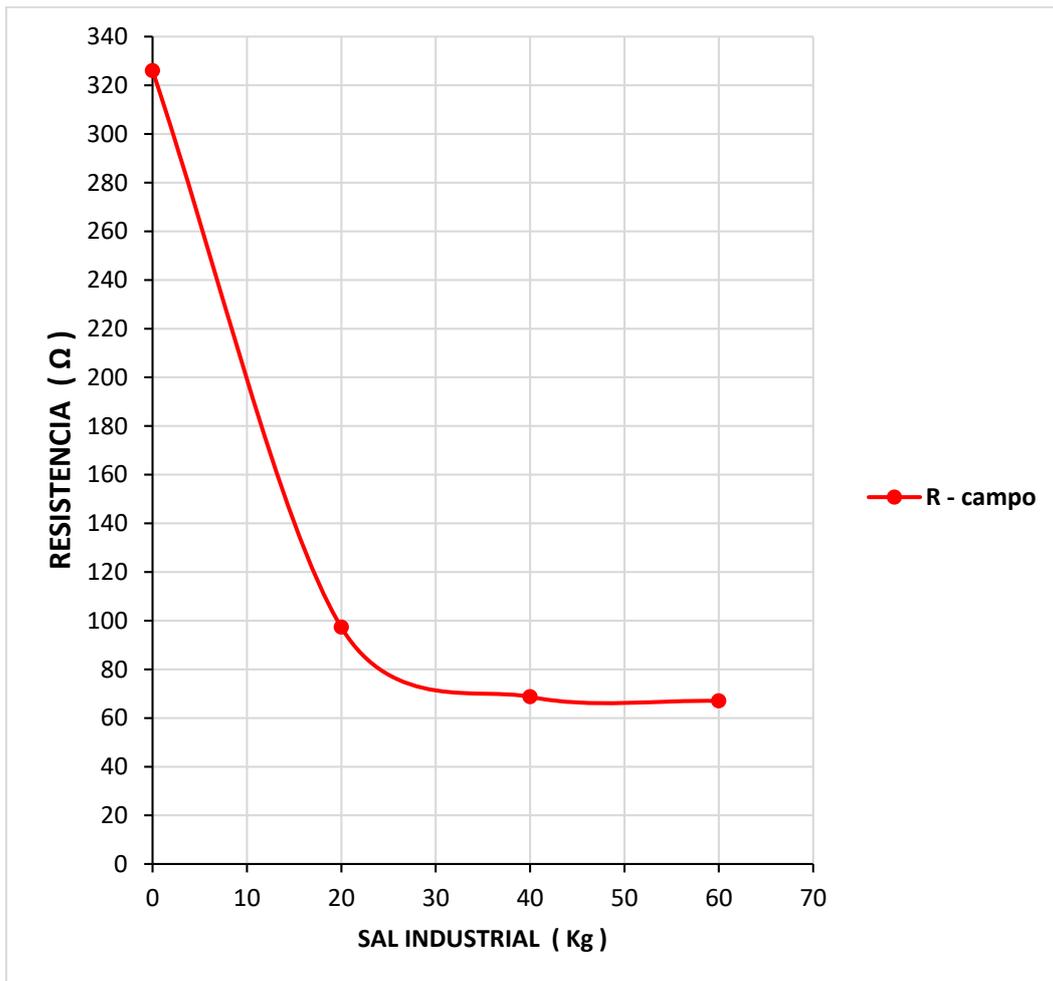
Ítem	Fecha	Hora	R ( $\Omega$ )
1	01/07/2018	17:27 pm	67

5. Comparando los resultados finales de cada cuadro:

Tabla 37.- Comparando los resultados de cada cuadro

Ítem	Cantidad (kg de sal/m <sup>3</sup> de tierra)	R( $\Omega$ )	Variación de R( $\Omega$ )	Variación %	variación acumulada %
1	0	326			0
2	20	97.3	228.7	70.15	70.15
3	40	68.7	28.6	8.77	78.92
4	60	67	1.7	0.52	79.44

## 6. Gráfica de la cantidad de sal industrial vs resistencia en campo



Gráfica 14.- Sal industrial vs resistencia en campo

- ✓ La primera prueba de Resistencia es 326.0  $\Omega \cdot m$  y nos sirve como referencia para poder determinar cuánto varía la resistividad cuando a  $1m^3$  de tierra se le añade 20 kg, 40 kg o 60 kg de Sal Industrial.
- ✓ Usar Sal Industrial 20kg por cada  $1m^3$  de tierra en este experimento redujo la resistividad hasta 70.15%, lo cual es una reducción considerable.
- ✓ Usar más de 40 kg por cada de  $1m^3$  de tierra ya no reduce la resistividad de manera significativa, para este caso a 40kg/ $1m^3$  redujo la resistividad en 8.77% más y 60 kg/ $1m^3$  redujo la resistividad en 0.52%. Usar mayores cantidades de Sal Industrial podría ser económicamente no viable.

## RESISTENCIA TEÓRICA

1. Se utiliza la siguiente formula:

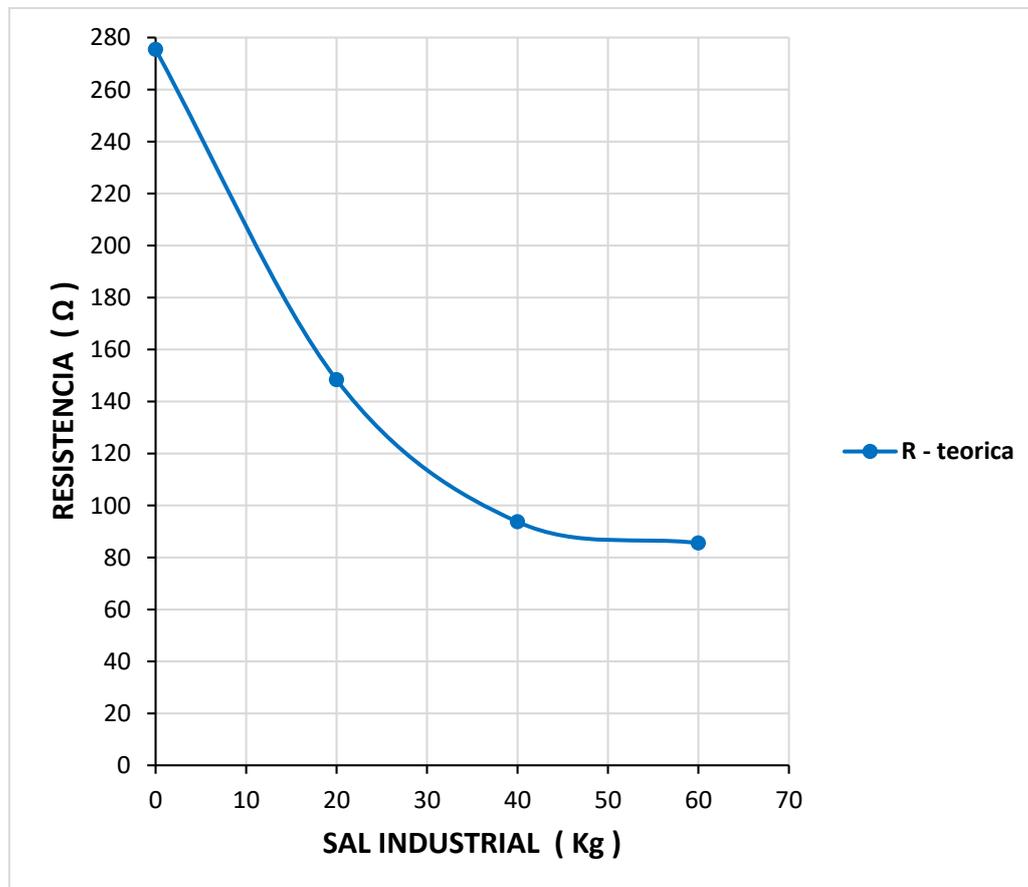
$$R = \rho [\ln (8L/d) - 1] / 2\pi L$$

- ✓ R: Resistencia teórica
- ✓  $\rho$ : Resistividad halla en campo
- ✓ Longitud del electrodo plantado en el pozo (L): 0.5 metros
- ✓ Diámetro del electrodo(d): 5/8" (0.015875 m) Diámetro del electrodo

Tabla 38.- Resistencia teórica

Ítem	Cantidad (kg de sal/m <sup>3</sup> de tierra)	$\rho$ ( $\Omega$ .m)	L (m)	d (m)	R ( $\Omega$ )
1	0	191	0.5	0.015875	275.42
2	20	102.9	0.5	0.015875	148.38
3	40	64.98	0.5	0.015875	93.70
4	60	59.31	0.5	0.015875	85.52

2. Gráfica de sal industrial vs resistencia teórica



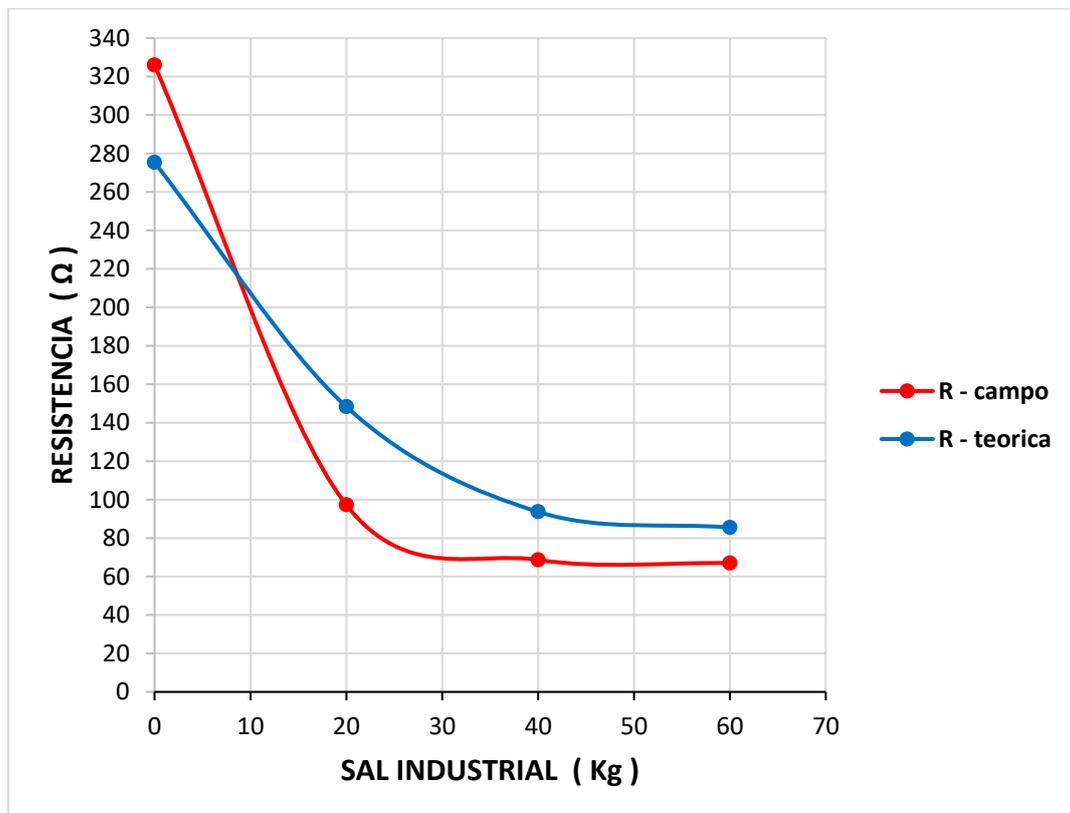
Gráfica 15.- Sal industrial vs resistencia teórica

### 3. Comparando la resistencia en campo y la resistencia teórica

Tabla 39.- Comparando la resistencia en campo y la resistencia teórica

Ítem	Cantidad (kg de sal/m <sup>3</sup> de tierra)	Rc: Resistencia en campo (Ω)	Rt : Resistencia Teórica (Ω)	Diferencia entre Rt y Rc (Ω)	% Diferencia entre Rt y Rc
1	0	326	275.42	- 50.58	18.36
2	20	97.3	148.38	51.08	34.42
3	40	68.7	93.7	25	26.68
4	60	67.0	85.52	18.52	21.65

### 4. Gráfica de la sal industrial vs resistencia teórica y la resistencia en campo



Gráfica 16.- Sal industrial vs resistencia teórica y la resistencia en campo

- ✓ Se observa que la resistencia en la primera medida tiene mayor valor numérico.
- ✓ En la segunda medida la resistencia disminuye considerablemente.
- ✓ En la tercera medida la resistencia sigue disminuyendo pero en menor proporción que la segunda medida.
- ✓ En la cuarta medida la resistencia casi no disminuye.

#### 4.5.- ANÁLISIS HIPOTÉTICO CUANDO LA BENTONITA, SAL INDUSTRIAL, CEMENTO CONDUCTIVO Y LONGITUD DEL ELECTRODO ACTUAN SOBRE UN MISMO POZO A TIERRA VERTICAL

Análisis de la fórmula de la resistencia

El valor de la resistencia es:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

- R: Resistencia ( $\Omega$ )
  - $\rho$ : Resistividad ( $\Omega.m$ )
  - L: longitud del electrodo (m)
  - d: diámetro del electrodo (m) , en este caso 5/8"
- 
- Donde la bentonita y la sal industrial hacen variar la resistividad ( $\rho$ ) del terreno y este a su vez hace variar la resistencia del pozo a tierra vertical
  - La longitud del electrodo y el cemento conductivo que forma un cilindro alrededor del electrodo hacen variar el valor de  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$  el cual será representado por K y este a su vez hace variar la resistencia del pozo a tierra vertical
  - Para ello hallaremos el factor de reducción de la bentonita, sal industrial, cemento conductivo y longitud del electrodo.

#### 4.5.1 LONGITUD DEL ELECTRODO

En la tabla N°3 se hallan los valores de K para cada valor de longitud del electrodo (L) .Estos valores son los siguientes:

Ítem	L (m)	K ( 1/m )
1	0.4	1.713
2	0.8	0.995
3	1.2	0.717
4	1.6	0.566
5	2	0.471
<b>6</b>	<b>2.4</b>	<b>0.404</b>
7	2.8	0.355
8	3.2	0.318
9	3.6	0.288
10	4	0.263
11	4.4	0.242
12	4.8	0.225
13	5.2	0.21
14	5.6	0.197
15	6	0.186
16	6.4	0.176
17	6.8	0.167
18	7.2	0.159
19	7.6	0.152
20	8	0.145
21	8.4	0.139
22	8.8	0.134
23	9.2	0.129
24	9.6	0.124
25	10	0.12
26	10.4	0.116
27	10.8	0.112
28	11.2	0.109
29	11.6	0.105
30	12	0.102

- Sin embargo los valores menores a 2.4 m para la longitud del electrodo no cumplen con la normativa del CNE por lo cual no serían viables.
- Así como los valores mayores a 2.4 m para la longitud del electrodo no son comerciables y además involucraría hacer un pozo a tierra vertical de mayores dimensiones y de mayor costo, por lo tanto tampoco sería viable
- El valor de  $k = 0.404 \frac{1}{m}$  para un  $L = 2.4$  m cumple con la normativa, es un electrodo comercial y de costo accesible.

#### 4.5.2 DIÁMETRO DEL CILINDRO FORMADO POR EL CEMENTO CONDUCTIVO (Dcc) ALREDEDOR DEL ELECTRODO DE 2.4 m DE LONGITUD

En la tabla N°8 se hallan los valores de Kcc para cada valor de Dcc

Estos valores son los siguientes:

Ítem	Dcc de CC(m)	kcc (1/m)
1	0.02	0.389
2	0.03	0.362
3	0.04	0.343
4	0.05	0.328
5	0.06	0.316
6	0.07	0.306
7	0.08	0.297
8	0.09	0.289
9	0.1	0.282
10	0.11	0.276
11	0.12	0.27
12	0.13	0.265
13	0.14	0.26
14	0.15	0.255
15	0.16	0.251
16	0.17	0.247
17	0.18	0.243
18	0.19	0.24
19	0.2	0.236
20	0.21	0.233
21	0.22	0.23
22	0.23	0.227
23	0.24	0.224
24	0.25	0.222
25	0.26	0.219
26	0.27	0.216
27	0.28	0.214
28	0.29	0.212
29	0.3	0.209

- El valor del Dcc más común que se utiliza en la construcción de un pozo a tierra vertical es el de 0.1 m (4") el cual da un valor de Kcc = 0.282. Sin embargo el cemento conductivo no es obligatorio por lo tanto no hay ninguna restricción para usar valores de Dcc menores a 0.1 m (4"). Si bien es cierto que podría haber un ahorro económico también es cierto que la reducción de la resistencia del pozo a tierra vertical sería menor.

- Así mismo se puede utilizar valores de Dcc mayores a 0.1 m (4") para tener una mayor reducción del valor de la resistencia del pozo a tierra vertical pero teniendo en consideración que ello aumentaría la cantidad de cemento conductor y por lo tanto el costo de instalación del pozo a tierra vertical

#### 4.5.3 BENTONITA

La bentonita hace variar la resistividad ( $\rho$ ) del terreno y este a su vez hace variar la resistencia del pozo a tierra vertical

Para hallar el factor que logra la reducción de la bentonita utilizaremos la tabla N°23, al cual nombraremos Factor Bentonita (FB). El FB se calcula

$$FB = (R_0 - R_B) / R_0$$

Donde:

- FB: Factor Bentonita
- $R_0$ : Resistencia inicial del pozo el cual no contiene bentonita
- $R_B$ : Resistencia del pozo cuando este contenga 20 Kg de bentonita /1m<sup>3</sup> de tierra, 40 Kg de bentonita /1m<sup>3</sup> de tierra o 60 Kg de bentonita /1m<sup>3</sup> de tierra. Si mantenemos la proporción sería 60 Kg de bentonita /3m<sup>3</sup> de tierra, 120 Kg de bentonita /3m<sup>3</sup> de tierra o 180 Kg de bentonita /3m<sup>3</sup> de tierra

Tabla 40.- Factor Bentonita

Bentonita para un pozo a tierra vertical de 3m <sup>3</sup>					
Cantidad de bentonita(Kg)	Resistencia( $\Omega$ )	Diferencia R( $\Omega$ )	% Reducción	% Queda	FB
0	305			100	1
60	107	198	64.92	35.08	0.35
120	81.8	223.2	73.18	26.82	0.27
180	81.4	223.6	73.31	26.69	0.27

#### 4.5.4 SAL INDUSTRIAL

La sal industrial hace variar la resistividad ( $\rho$ ) del terreno y este a su vez hace variar la resistencia del pozo a tierra vertical

Para hallar el factor que logra la reducción de la sal industrial utilizaremos la tabla N°35, al cual nombraremos Factor Sal (FS). El FS se calcula:

$$FS = (R_0 - R_s) / R_0$$

Donde:

- FS: Factor Sal
- $R_0$ : Resistencia inicial del pozo el cual no contiene sal industrial
- $R_s$ : Resistencia del pozo cuando este contenga 20 Kg de sal industrial /1m<sup>3</sup> de tierra, 40 Kg de sal industrial/1m<sup>3</sup> de tierra o 60 Kg de sal industrial/1m<sup>3</sup> de tierra. Si mantenemos la proporción sería 60 Kg de sal industrial/3m<sup>3</sup> de tierra, 120 Kg de sal industrial/3m<sup>3</sup> de tierra o 180 Kg de sal industrial/3m<sup>3</sup> de tierra.

Tabla 41.- Factor Sal

Sal industrial para un pozo a tierra vertical de 3m <sup>3</sup>					
Cantidad de sal industrial(Kg)	Resistencia( $\Omega$ )	Diferencia R( $\Omega$ )	% Reducción	% Queda	FS
0	326			100	1
60	95.4	230.6	70.74	29.26	0.29
120	67.4	258.6	79.33	20.67	0.21
180	66	260	79.75	20.25	0.20

#### 4.5.5 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA FINAL EN FUNCIÓN DE LOS FACTORES RELACIONADOS A BENTONITA, SAL INDUSTRIAL, CEMENTO CONDUCTIVO Y LONGITUD DEL ELECTRODO

De la fórmula de la resistencia para un pozo a tierra vertical:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

$$K = \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

A. Para un pozo a tierra vertical sin cemento conductivo se hallaría la siguiente formula:

$$R = \rho \times K$$

Como FB y FS influyen directamente en  $\rho$  ahora la resistividad equivaldría a ( $\rho_0 \times FB \times FS$ )

$$R = (\rho_0 \times FB \times FS) \times K$$

$$R = (\rho_0 \times FB \times FS) \times K$$

Donde:

- R: Resistencia del pozo a tierra vertical
- $\rho_0$ : Resistividad inicial del terreno, sin bentonita ni sal industrial
- FB: Factor Bentonita,
- FS: Factor Sal
- K:  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$ , donde  $d = 5/8"$  y L es la longitud del electrodo

B. Para un pozo a tierra vertical con cemento conductivo se hallaría la siguiente formula:

$$R = \rho \times K$$

Como FB y FS influyen directamente en  $\rho$  ahora la resistividad equivaldría a  $(\rho_0 \times FB \times FS)$  y K sería reemplazado por Kcc

$$R = (\rho \times RB \times FS) \times K_{cc}$$

Donde:

- R: Resistencia del pozo a tierra vertical
- $\rho$ : Resistividad inicial del terreno, sin bentonita ni sal industrial
- FB: Factor Bentonita,
- FS: Factor Sal
- Kcc:  $[\ln(8L/d)-1]/2\pi L$ , donde  $d = D_{cc}$  y la longitud del electrodo(L)=2.4 m

#### 4.5.6 VALOR DE LA RESISTENCIA OPTIMIZANDO LA CANTIDAD DE LA LONGITUD DEL ELECTRODO, CEMENTO CONDUCTIVO, BENTONITA Y SAL INDUSTRIAL

De los cálculos analizados:

$$R = (\rho_0 \times FB \times FS) \times K$$

- FB óptimo es cuando se utiliza 120 Kg de bentonita en  $3m^3$  de un pozo a tierra,  $FB = 0.27$
- FS óptimo es cuando se utiliza 120 Kg de bentonita en  $3m^3$  de un pozo a tierra  $FS = 0.21$
- El K óptimo es cuando el electrodo contiene cemento conductivo es decir con Kcc, el cual para  $D_{cc}$  de 4" tiene un valor  $K_{cc} = 0.282 \frac{1}{m}$

Reemplazando tendríamos lo siguiente:

$$R = (\rho_0 \text{ } \Omega m \times 0.27 \times 0.21) \times 0.282 \frac{1}{m}$$

$$R = 0.01598 \times \rho_0 (\Omega)$$

$$R = 1.598\% \times \rho_0 (\Omega)$$

Donde la resistencia (R) sería igual al 1.598% del valor numérico resistividad inicial ( $\rho_0$ )

#### 4.5.7 RESISTIVIDAD DE TERRENOS QUE DESPUES DE SER SOMETIDOS A TRATAMIENTO TENDRÁN UNA RESISTENCIA MENOR A 25 Ω

Teniendo en consideración que el CNE para una puesta a tierra con un solo electrodo exige valores de resistencia menores a 25 Ω, entonces:

$$1.598 \% \left( \frac{\Omega}{\Omega.m} \right) \times \text{Resistividad} < 25 \Omega$$

$$\text{Resistividad} < 1564.45 \Omega.m$$

Con lo cual un terreno de resistividad menor a 1564.45 Ω m y que al ser sometido a tratamiento con un factor de reducción al 1.598 % entonces el valor de la resistencia del pozo a tierra será menor a 25 Ω, por lo tanto se estará cumpliendo lo exigido por el CNE.

Tabla 42.- Valores de la resistividad del terreno que al ser sometido a tratamiento con un factor de reducción al 1.598 % tendrán una resistencia menor a 25 Ω.

Item	Resistividad (Ω.m)	Factor de reducción ( Ω / Ω.m )	Resistencia (Ω)	Menor a 25 Ω
1	100	1.598%	1.598	SI
2	200	1.598%	3.196	SI
3	300	1.598%	4.794	SI
4	400	1.598%	6.392	SI
5	500	1.598%	7.990	SI
6	600	1.598%	9.588	SI
7	700	1.598%	11.186	SI
8	800	1.598%	12.784	SI
9	900	1.598%	14.382	SI
10	1000	1.598%	15.980	SI
11	1100	1.598%	17.578	SI
12	1200	1.598%	19.176	SI
13	1300	1.598%	20.774	SI
14	1400	1.598%	22.372	SI
15	1500	1.598%	23.970	SI
16	1600	1.598%	25.568	NO
17	1700	1.598%	27.166	NO

#### **4.6 MATERIALES DE UN POZO A TIERRA VERTICAL ÓPTIMO**

Se recomienda construir los pozos a tierra vertical con los siguientes materiales y sus respectivas cantidades:

##### **ELECTRODO DE COBRE:**

- El electrodo de cobre más comerciables es el de 5/8"x2.4 m así como el de 3/4"x2.4 m

##### **CONECTOR DE COBRE DEL ELECTRODEO**

- La medida de este conector de cobre depende del diámetro del electrodo de cobre siendo el de 5/8" y el de 3/4" los más comerciables

##### **CAJA DE REGISTRO**

- La NTP 370.052 recomienda (no es obligatorio) que la protección externa del pozo (caja de registro) tenga un diámetro de 0.1 m mínimo y una profundidad de 0.4 m mínimo.

La caja de registro puede ser de material:

- CONCRETO, generalmente de tapa cuadrada 0.405 m x 0.405 m con una profundidad de 0.3 m
- POLIPROPILENO: generalmente de tapa circular de diámetro 0.3 m con una profundidad de 0.26 m

##### **TIERRA DE CHACRA**

- Utilizar tierra de chacra (terreno agrícola) la cual tiene una resistividad promedio de 50  $\Omega$ .m, al ser menor el valor de la resistividad por lo tanto el valor de la resistencia del pozo se reducirá considerablemente.
- La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio contorno que va de 0 a 0.5 m de este. El cambio total parcial del terreno deberá ser lo suficiente para que electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de mínimo 0.5 m en todo su contorno así como en su fondo.
- El volumen de un pozo a tierra vertical puede ser de  $(\pi \times 0.5^2 m^2) \times 3 m = 2.35 m^3$  (0.5 m de radio alrededor del electrodo y profundidad de 3 m) y tendría el mismo efecto que un pozo a tierra de  $(1m \times 1m) \times 3m = 3 m^3$  (largo de 1 m, ancho de 1 m y profundidad de 3 m). Utilizar 2.35 m<sup>3</sup> de tierra permite reducir costos en la construcción de un pozo a tierra vertical.

## CEMENTO CONDUCTIVO

- Por recomendación utilizar 50 Kg de cemento conductivo la cual tendrá una forma cilíndrica de longitud 2.4 m y diámetro 4" (0.1 m aprox.) el cual rodeara al electrodo de cobre

## BENTONITA

- Se recomienda utilizar 120 Kg de bentonita para un pozo a tierra vertical de 3 m<sup>3</sup> de volumen

## SAL INDUSTRIAL

- Se recomienda utilizar 120 Kg de sal industrial para un pozo a tierra vertical de 3 m<sup>3</sup> de volumen

Tabla 43.- Cuadro resumen de los materiales para un pozo a tierra vertical óptimo

ITEM	MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	USO OBLIGATORIO	COMENTARIO
1	Electrodo de cobre	1	unidad	SI	longitud de 2.4m y diámetro de 5/8" ( forma cilíndrica )
2	Conector de cobre	1	unidad	SI	para electrodo de diámetro de 5/8"
3	Caja de registro	1	unidad	SI	
4	Tierra de chacra	3	m <sup>3</sup>	NO	(1 m x 1 m) x 3 m = 3m <sup>3</sup> o también ( $\pi \times 0.5^2 \text{ m}^2$ ) x 3 m = 2.35 m <sup>3</sup>
5	Cemento conductivo	50	Kg	NO	longitud 2.4 m y diámetro 4" ( forma cilíndrica )
6	Bentonita	120	Kg	NO	
7	Sal industrial	120	Kg	NO	

Ilustración de un pozo a tierra vertical óptimo:



Figura 29.- Vista superior del pozo a tierra vertical clásico (lado izquierdo) y vista superior de un pozo a tierra de radio 0.5 m (lado derecho)

Fuente: autoría propia

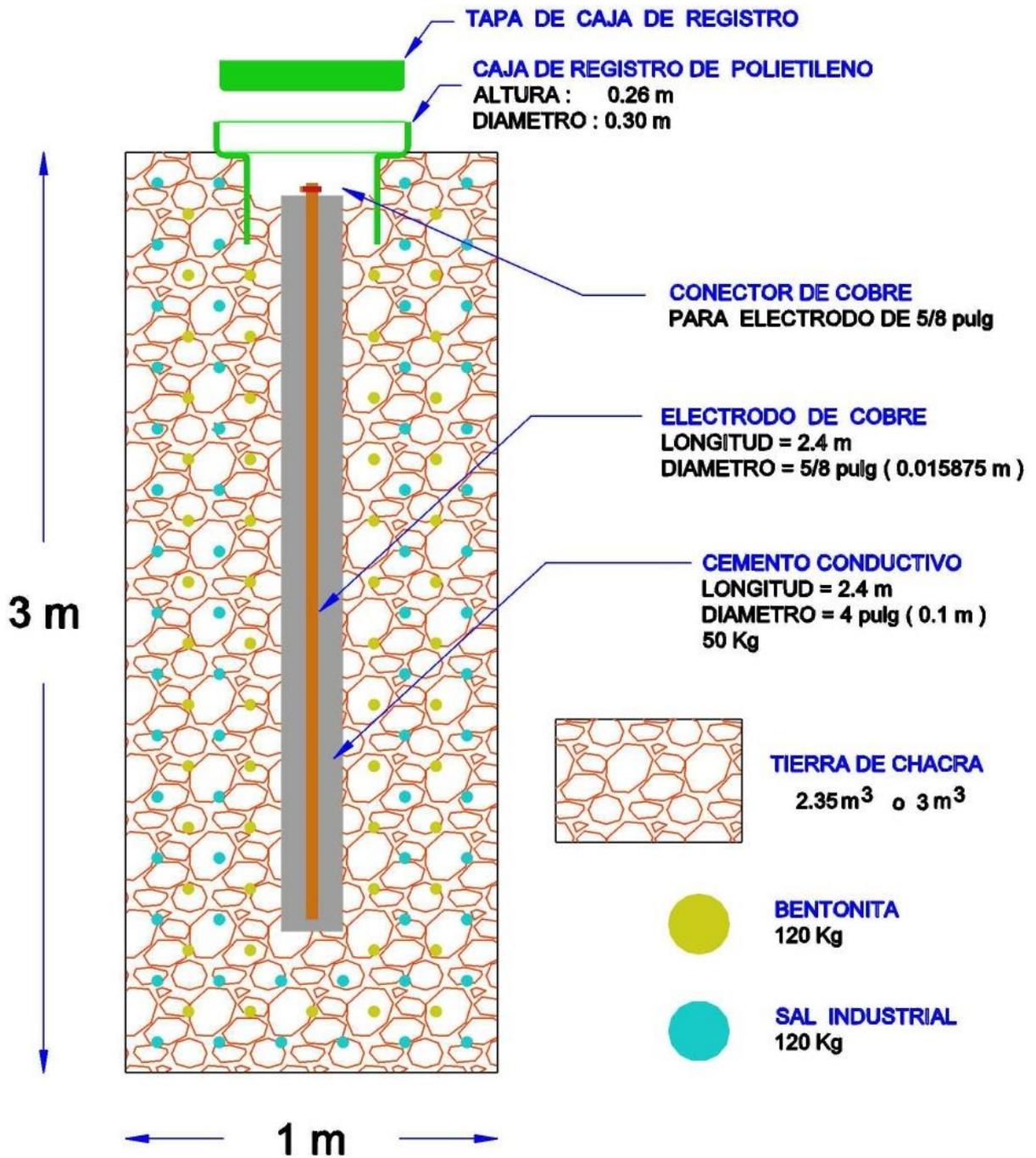


Figura 30.- Vista frontal de un pozo a tierra vertical

Fuente: autoría propia

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## 5.1 CONCLUSIONES

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta las cantidades de sal industrial, bentonita, cemento conductor y longitud del electrodo.

Mediante un análisis de las pruebas realizadas en campo se concluyó que la proporción óptima de los materiales empleados para la construcción de un pozo a tierra vertical de  $3\text{m}^3$  es cuando la longitud de un electrodo es 2.4 m, el diámetro del cilindro formado por el cemento conductor alrededor del electrodo es 4" (0.1016 m), la cantidad de bentonita es  $120\text{ Kg}/3\text{ m}^3$  y la cantidad de sal industrial es  $120\text{ Kg}/3\text{ m}^3$

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta la longitud del electrodo.

Un electrodo de 2.4 m reduce significativamente la resistencia a un valor de 40.438% respecto al valor numérico de la resistividad del terreno. Usar electrodos de mayor longitud a 2.4 m reduce la resistencia pero podría generar inconvenientes económicos o que a mayor profundidad del electrodo, la resistividad del terreno podría ser mayor y por ende la resistencia aumentaría a pesar de que el electrodo sea de mayor longitud.

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta el diámetro del cilindro formado alrededor del electrodo.

La resistencia de un electrodo revestido de forma cilíndrica con cemento conductor y el cual tiene un diámetro de 4" este puede lograr una reducción porcentual de 57.38% con respecto a la resistencia de un electrodo sin revestir de cemento conductor y de la misma longitud.

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta las cantidades de bentonita.

La proporción 40 kg de bentonita por cada  $1\text{m}^3$  de tierra (se usa para un PAT la cantidad de 120 kg de bentonita por cada  $3\text{m}^3$  de tierra, cantidad usada de manera empírica en campo) es recomendable ya que logra reducir la resistencia hasta en un 64.91%.

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta las cantidades de sal.

La proporción 40 kg de sal por cada 1m<sup>3</sup> de tierra (es decir 120 kg de sal por cada 3m<sup>3</sup> se y este se aproxima a la cantidad de 100 kg de sal por cada 3m<sup>3</sup> de tierra de un PAT, cantidad usada de manera empírica en campo) es recomendable ya que logra reducir la resistencia hasta en un 78.92%.

- La bentonita y la sal industrial hacen variar la resistividad ( $\rho$ ) del terreno; la longitud del electrodo y el cemento conductor que forma un cilindro alrededor del electrodo hacen variar el valor de  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$  y estos a su vez hacen variar la resistencia del pozo a tierra vertical. Originando una nueva fórmula de la resistencia  $R = (\rho_0 \times FB \times FS) \times K$ . Donde  $\rho_0$  es la resistividad inicial del terreno, FB es el Factor Bentonita, FS es el Factor Sal y K es  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$ .

Se concluyó que al unir las proporciones óptimas en un pozo a tierra, nos da una resistencia de valor 1.598% (0.01598) del valor numérico de la resistividad. Para terrenos con una resistividad menor a 1564.45  $\Omega \cdot m$  y que son sometidos a tratamiento con una reducción al 1.598 %, el valor de la resistencia del pozo a tierra con un solo electrodo será menor a 25  $\Omega$ , por lo tanto se estará cumpliendo lo exigido por el CNE.

- Se concluye que la resistencia de un pozo a tierra disminuye a medida que se aumenta las cantidades de sal industrial, bentonita, cemento conductor y longitud del electrodo. Sin embargo existe un punto de saturación en el cual los materiales empleados ya no producen ningún efecto sobre la resistencia del pozo a tierra vertical.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar electrodos de 2.4 m de longitud por ser de un precio accesible y a la vez reducir la resistencia de manera significativa.
- Considerar que la fórmula de la resistencia de uso general para un electrodo es para una resistividad de terreno pero en un mismo terreno pueden existir varias resistividades. Por lo cual se recomienda considerar este factor.
- Se recomienda usar cemento conductor de calidad que tenga ficha técnica. El cemento conductor debe revestir en lo máximo posible al electrodo.
- Si la resistividad del terreno es alta y se quiere reducir aún más la resistencia del PAT se recomienda usar la proporción 40 kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra (lo cual equivale 120 kg de bentonita por cada 3m<sup>3</sup> de tierra) ya que logra reducir la resistencia hasta en un 73.17%, lo cual es 8.26% más de reducción del valor de la resistencia respecto a cuando se usa la proporción de 20 kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra. Usar proporciones mayores a 40 kg de bentonita por cada 1m<sup>3</sup> de tierra ya no genera reducciones del valor de la resistencia ya que se llegó a un punto de saturación en el que la bentonita no genera efectos sobre la resistencia de un PAT.
- Se recomienda no usar proporciones mayores a 40 kg de sal por cada 1m<sup>3</sup> de tierra (lo cual equivale 120 kg de sal por cada 3m<sup>3</sup> de tierra) debido a que no genera reducciones del valor de la resistencia ya que se llegó a un punto de saturación en el que la sal no genera efectos sobre la resistencia de un PAT. Mayores cantidades de sal puede corroer el electrodo del PAT.

# **CAPÍTULO VI**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **BIBLIOGRAFÍA:**

### **Trabajos Citados**

- Efraín, T. (2008). Prácticas y uso de puestas a tierra en redes eléctricas de baja tensión; mejoramiento de las puestas a tierra-tratamiento mediante insumos químico. (Informe de suficiencia).Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.
- Nelson, M. (1999). Sistema de puesta a tierra. Santiago de Chile: ProCobre.
- Francisco, L. (2007). Sistema de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas. Maracay: Unexpo.

### **Libros**

- Martínez, J.J.; Toledano, J.C. (1997).Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas. Madrid: Paraninfo.

### **Artículos de Revistas**

- Norma Técnica Peruana 370.052 –SEGURIDAD ELECTRICA. Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra. Indecopi - Lima 1999
- Código Nacional Eléctrico – Utilización, sección 60. MINEM– Lima 2006

### **Páginas Web**

- Guía de medición de tierra.(2015).Recuperado de [http://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/cat\\_guia\\_d\\_e\\_medicion\\_de\\_tierra\\_ed2.pdf](http://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_d_e_medicion_de_tierra_ed2.pdf)
- Medición de resistencia de tierra.(2016).Recuperado de [http://www.etaelectro.com/files/technical\\_articles/1.pdf](http://www.etaelectro.com/files/technical_articles/1.pdf)
- Resistencia de puesta a tierra. (2017). Recuperado de [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902802\\_ENG\\_A\\_W.PDF](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902802_ENG_A_W.PDF)

- Sistema de puesta a tierra.(2014).Recuperado de <https://www.analfatecnicos.net/archivos/08.PuestaATierra.pdf>
- Manual de puesta a tierra THOR-GEL.(2013).Recuperado de <http://www.eliseosebastian.com/documentos/ManualPuestaTierra.pdf>

# **CAPÍTULO VII**

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### RESISTENCIA DE UN POZO A TIERRA VERTICAL PARA ELECTRODOS DE COBRE DE DIAMETROS 3/4" y 5/8" AMBOS DE 2.4 m DE LONGITUD

Analizaremos la resistencia de un pozo a tierra vertical donde  $\rho$  y  $L$  serán constantes y lo único que los diferencia es el diámetro del electrodo de cobre.

Donde:

- $R$ : resistencia del pozo a tierra vertical
- $\rho$  : resistividad del terreno
- Longitud del electrodo de cobre ( $L$ ) = 2.4 m
- 3/4" = 0.019050 m
- 5/8" = 0.015875 m

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{\rho [ \ln ( 8.L / d_{3/4} ) - 1 ] / 2.\pi.L}{\rho [ \ln ( 8.L / d_{5/8} ) - 1 ] / 2.\pi.L}$$

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{\ln ( 8.L / d_{3/4} ) - 1}{\ln ( 8.L / d_{5/8} ) - 1}$$

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{\ln ( 8 \times 2.4 / 0.019050 ) - 1}{\ln ( 8 \times 2.4 / 0.015875 ) - 1}$$

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{\ln ( 1007.87 ) - 1}{\ln ( 1209.44 ) - 1}$$

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{6.91 - 1}{7.09 - 1}$$

$$\frac{R_{3/4}}{R_{5/8}} = \frac{5.91}{6.09}$$

$$R_{3/4} / R_{5/8} = 0.9704 = 97.04 / 100 = 97.04\% / 100\%$$

La resistencia de electrodo cobre de diámetro 3/4" y de longitud 2.4 m es menor en  $100\% - 97.04\% = 2.96\%$  con respecto a un electrodo de cobre diámetro 5/8" y de longitud 2.4 m

## ANEXO 2

### REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA CUANDO SE INCREMENTA LA LONGITUD DEL ELECTRODO

#### 1. Análisis de la fórmula de la resistencia

El valor de la resistencia es:

$$R = \rho \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} \right) - 1 \right] / 2\pi L$$

- R: Resistencia ( $\Omega$ )
- $\rho$ : Resistividad ( $\Omega.m$ )
- L: longitud del electrodo (m)
- d: diámetro del electrodo (m)

Analizaremos R en función de la longitud del electrodo (L)

Para ello:

- L: 2.4 m
- d: 0.002 m a 0.060 m
- K :  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$  , toma un valor constante cuando se precisa el valor de L y d
- $\rho$ : 100%  $\rho$   $\Omega.m$ , Le damos un valor de (100%  $\rho$ )  $\Omega.m$  para facilitar la gráfica.

Quedando la formula general:

$$R = \rho K = 100\% \rho K$$

2. Se obtiene los siguientes resultados:

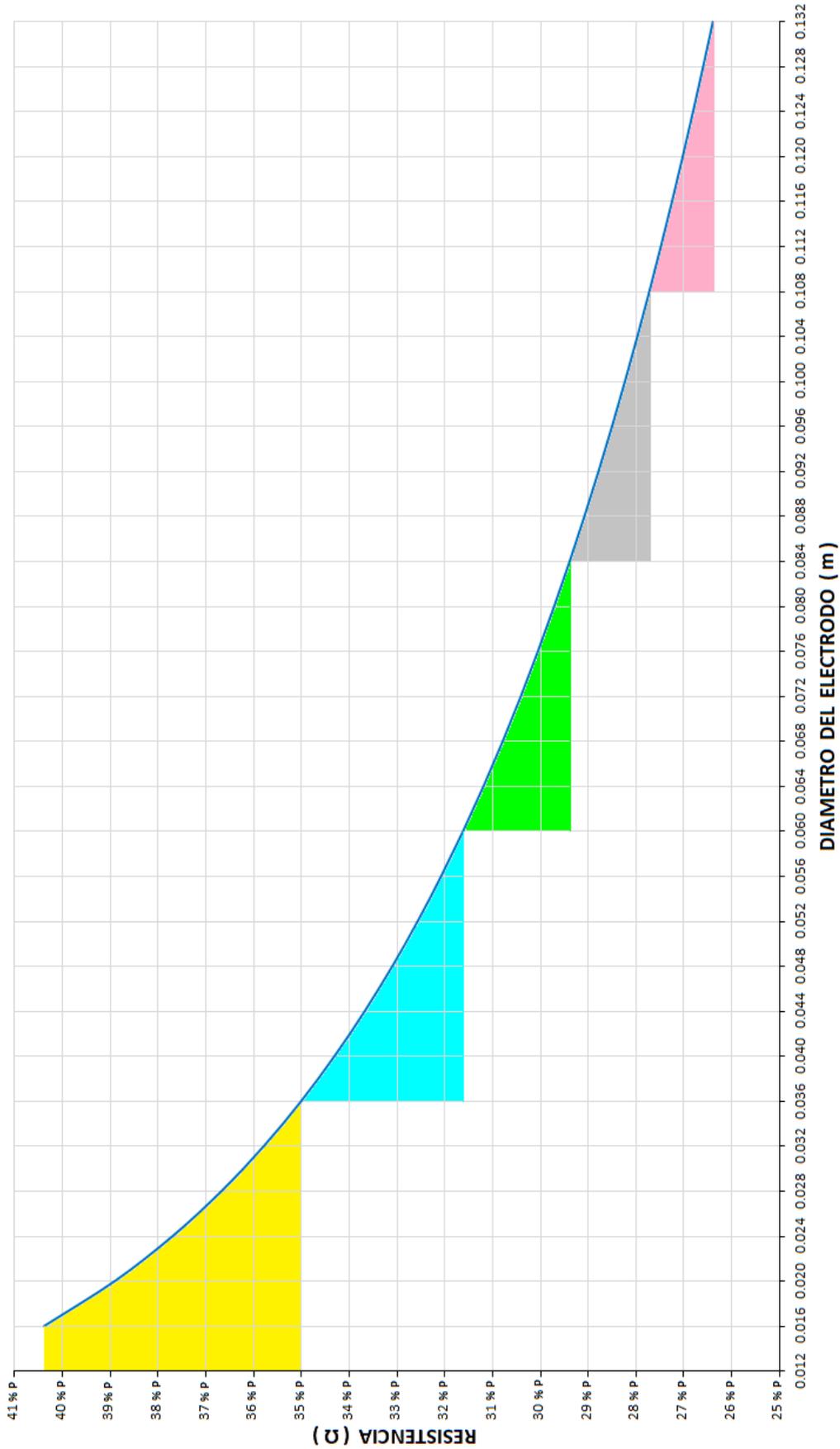
Tabla 43. - Variación de la resistencia en función al diámetro del electrodo

Ítem	d (m)	L (m)	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	K (1/m)	R ( $\Omega$ )	variación de R ( $\Omega$ )	variación % de R
1	0.016	2.4	100 % $\rho$	0.4038	40.38 % $\rho$		
2	0.020	2.4	100 % $\rho$	0.3890	38.90 % $\rho$	1.48 % $\rho$	3.66
3	0.024	2.4	100 % $\rho$	0.3769	37.69 % $\rho$	1.21 % $\rho$	3.11
4	0.028	2.4	100 % $\rho$	0.3667	36.67 % $\rho$	1.02 % $\rho$	2.71
5	0.032	2.4	100 % $\rho$	0.3578	35.78 % $\rho$	0.89 % $\rho$	2.41
6	0.036	2.4	100 % $\rho$	0.3500	35.00 % $\rho$	0.78 % $\rho$	2.18
7	0.040	2.4	100 % $\rho$	0.3430	34.30 % $\rho$	0.70 % $\rho$	2.00
8	0.044	2.4	100 % $\rho$	0.3367	33.67 % $\rho$	0.63 % $\rho$	1.84
9	0.048	2.4	100 % $\rho$	0.3310	33.10 % $\rho$	0.57 % $\rho$	1.71
10	0.052	2.4	100 % $\rho$	0.3256	32.56 % $\rho$	0.54 % $\rho$	1.60
11	0.056	2.4	100 % $\rho$	0.3207	32.07 % $\rho$	0.49 % $\rho$	1.51
12	0.060	2.4	100 % $\rho$	0.3162	31.62 % $\rho$	0.45 % $\rho$	1.43
13	0.064	2.4	100 % $\rho$	0.3119	31.19 % $\rho$	0.43 % $\rho$	1.35
14	0.068	2.4	100 % $\rho$	0.3079	30.79 % $\rho$	0.40 % $\rho$	1.29
15	0.072	2.4	100 % $\rho$	0.3041	30.41 % $\rho$	0.38 % $\rho$	1.23
16	0.076	2.4	100 % $\rho$	0.3005	30.05 % $\rho$	0.36 % $\rho$	1.18
17	0.080	2.4	100 % $\rho$	0.2971	29.71 % $\rho$	0.34 % $\rho$	1.13
18	0.084	2.4	100 % $\rho$	0.2938	29.38 % $\rho$	0.33 % $\rho$	1.09
19	0.088	2.4	100 % $\rho$	0.2908	29.08 % $\rho$	0.30 % $\rho$	1.05
20	0.092	2.4	100 % $\rho$	0.2878	28.78 % $\rho$	0.30 % $\rho$	1.01
21	0.096	2.4	100 % $\rho$	0.2850	28.50 % $\rho$	0.28 % $\rho$	0.98
22	0.100	2.4	100 % $\rho$	0.2823	28.23 % $\rho$	0.27 % $\rho$	0.95
23	0.104	2.4	100 % $\rho$	0.2797	27.97 % $\rho$	0.26 % $\rho$	0.92
24	0.108	2.4	100 % $\rho$	0.2772	27.72 % $\rho$	0.25 % $\rho$	0.89
25	0.112	2.4	100 % $\rho$	0.2748	27.48 % $\rho$	0.24 % $\rho$	0.87
26	0.116	2.4	100 % $\rho$	0.2724	27.24 % $\rho$	0.24 % $\rho$	0.85
27	0.120	2.4	100 % $\rho$	0.2702	27.02 % $\rho$	0.22 % $\rho$	0.83
28	0.124	2.4	100 % $\rho$	0.2680	26.80 % $\rho$	0.22 % $\rho$	0.80
29	0.128	2.4	100 % $\rho$	0.2659	26.59 % $\rho$	0.21 % $\rho$	0.79
30	0.132	2.4	100 % $\rho$	0.2639	26.39 % $\rho$	0.20 % $\rho$	0.77

Donde:

- L: longitud del electrodo (m)
- $\rho$ : Resistividad del terreno ( $\Omega \cdot m$ ) , para este caso es 100%  $\rho$
- K :  $[\ln(8L/d) - 1] / 2\pi L$
- R: Resistencia ( $\Omega$ )
- Variación de R ( $\Omega$ ): Diferencia entre la resistencia de un electrodo de diámetro (d) y la resistencia de un electrodo de diámetro (d + 0.004)
- Variación % de R ( $\Omega$ ): Variación porcentual entre la resistencia de un electrodo de longitud (d) y la resistencia de un electrodo de longitud (d+0.004)

### 3. Gráfica del diámetro del electrodo vs resistencia



Gráfica 1.- Diámetro del electrodo vs resistencia

4. Se puede observar lo siguiente:

Para un diámetro de un electrodo de:

- 0.016 m tiene una resistencia de 40.38 %  $\rho \Omega$
- 0.040 m tiene una resistencia de 34.30 %  $\rho \Omega$  ,  
varía  $(40.38 - 34.30)/40.38 \times 100\% = 15.05\%$  respecto del de 0.016 m
- 0.064 m tiene una resistencia de 31.19 %  $\rho \Omega$  ,  
varía  $(34.30 - 31.19)/34.30 \times 100\% = 9.06\%$  respecto del 0.040 m
- 0.088 m tiene una resistencia de 29.08 %  $\rho \Omega$  ,  
varía  $(31.19 - 29.08)/31.19 \times 100\% = 6.76\%$  respecto del 0.064 m
- 0.112 m tiene una resistencia de 27.48 %  $\rho \Omega$  ,  
varía  $(29.08 - 27.48)/29.08 \times 100\% = 5.50\%$  respecto del 0.088 m

Con lo cual podemos concluir que usar un electrodo de diámetro 0.016 m (5/8" aprox.) o de diámetro 0.020 (3/4" aprox.) reduce significativamente la resistencia a un valor de 40.38 % y 38.90 % respectivamente respecto al valor numérico de la resistividad del terreno. Usar electrodos de mayor diámetro a 0.016 m (5/8" aprox.) o de diámetro 0.020 (3/4" aprox.) reduce la resistencia pero podría generar los siguientes inconvenientes:

- Económicamente ya no sería viable debido a que tiene un mayor costo al de 0.016 m (5/8" aprox.) o de diámetro 0.020 (3/4" aprox.)
- No son tan comerciables
- Debido a su peso , transportarlos podría generar dificultades

# MTD 20KWe



## TELURÍMETRO DIGITAL

- ✓ MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
- ✓ MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO
- ✓ MEDICIÓN DE TENSIONES ESPURIAS
- ✓ RANGO DE RESISTENCIA: HASTA 20K $\Omega$
- ✓ RESOLUCIÓN: 0,01 $\Omega$
- ✓ ALTA PRECISIÓN
- ✓ ALTA INMUNIDAD A LAS INTERFERENCIAS
- ✓ VISOR NUMÉRICO DE 3½ DÍGITOS

**MEGABRAS**  
www.megabras.com

El telurímetro digital MTD-20KWe permite medir resistencias de puesta a tierra (PAT), resistividad del terreno por el método de Wenner y las tensiones espurias provocadas por las corrientes parásitas en el suelo.

El campo de aplicación de este equipo incluye la verificación de la PAT de edificios, instalaciones industriales, hospitalarias y domiciliarias, pararrayos, antenas, subestaciones, etc. Midiendo la resistividad puede evaluarse la estratificación del terreno para optimizar el diseño de los sistemas de PAT más complejos.

Por su elaborado sistema de filtros activos y pasivos, posee una elevada inmunidad a las interferencias eléctricas y permite obtener mediciones confiables incluso en presencia de altas tensiones parásitas como las que suelen encontrarse en algunas áreas urbanas y en la proximidad de subestaciones de transformación.

La corriente de medición, regulada electrónicamente, es alterna con una frecuencia de 1470Hz, lo cual permite evaluar adecuadamente el comportamiento de la instalación de PAT tanto en relación a una falla de frecuencia industrial como frente a una descarga atmosférica.

Posee una señal acústica que alerta al operador cuando la corriente inyectada en el terreno es insuficiente para realizar la medición. Esta alarma evita que, por no advertirse esta situación, se informen valores de resistencias inválidos.

Por su amplio rango de medición (desde 0,01 $\Omega$  hasta 20K $\Omega$ ), este equipo permite mediciones confiables en todo tipo de terreno, incluso aquellos con muy alta resistividad.

Es un instrumento de utilización muy simple, con lectura directa en su visor de 3 ½ dígitos. Se provee con las jabalinas auxiliares y cables requeridos para las mediciones típicas.

Su gabinete es robusto, de fácil y seguro transporte. Es adecuado para operar en condiciones geográficas y ambientales adversas, con temperaturas extremas en regiones frías o tropicales y elevadas alturas en zonas montañosas, por lo que presenta un óptimo desempeño en los trabajos de campo, en cualquier situación.

Figura N°1.- Ficha técnica del telurómetro Megabras (1 de 2)

## MTD 20KWe - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

### APLICACIÓN

Medición de resistencias de puesta a tierra (con 3 bornes), resistividad del suelo por el método de Wenner (con 4 bornes) y tensiones presentes en el terreno.

### MÉTODO DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA

El telurímetro inyecta en el terreno una corriente estabilizada electrónicamente (por lo que no se requieren ajustes previos a la medición), y mide con alta precisión la tensión que se desarrolla en el terreno por la circulación de esa corriente a través de la resistencia de difusión del electrodo hincado. La lectura de R es directa en el visor.

### INMUNIDAD A LAS PERTURBACIONES

La frecuencia de operación cumple con la ecuación:

$$f_g = \frac{2n+1}{2} \times f_i$$

Donde:

$f_g$  = frecuencia de la corriente generada por el telurímetro

$n$  = número entero.

$f_i$  = frecuencia industrial.

El cumplimiento de esta ecuación implica que la frecuencia de operación no coincide con ninguna armónica de la frecuencia industrial, lo cual permite, mediante el empleo de filtros adecuados, eliminar el efecto de las corrientes parásitas que suelen estar presentes en los terrenos estudiados.

### FUNCIONAMIENTO COMO VOLTÍMETRO

En la función voltímetro, el equipo opera como voltímetro convencional de C.A. y permite verificar la presencia y medir las tensiones generadas por las corrientes parásitas.

### ESCALAS DE MEDICIÓN

Resistencias: 0-20; 0-200; 0-2.000 e 0-20k $\Omega$

Tensión: 0-200V~

### EXACTITUD

Medición de resistencias:  $\pm 2\%$  del valor medido  $\pm 1\%$  del fondo de escala.

Medición de tensión:  $\pm 2\%$  del valor medido  $\pm 1\%$  del fondo de escala.

### RESOLUCIÓN DE LECTURA

0,01 $\Omega$  en la medición de resistencia.

0,1V en la medición de tensión.

### POTENCIA Y CORRIENTE DE SALIDA

Opera con una potencia de salida inferior a 0,5W y con una corriente inferior a 15 mA (pico a pico).

### ALIMENTACIÓN

Batería recargable interna

### CARGADOR DE BATERÍA

El circuito inteligente ajusta la carga de la batería a los parámetros optimizados para garantizar la máxima vida útil. Si alimenta por fuente externa para 95-240V~ (provisto con el equipo) o de una batería del automóvil de 12V.

### ALARMA ACÚSTICA

Advierte al operador cuando existen anomalías en el circuito de corriente que dificultan la obtención de un resultado confiable.

### TEMPERATURA DE OPERACIÓN

-10°C a 50°C

### TEMPERATURA DE ALMACENAMIENTO

-25°C a 65°C

### HUMEDAD

95% RH (sin condensación)

### ALTURA MÁXIMA

5000 m sobre el nivel del mar

### PESO DEL EQUIPO

Aprox. 2,3 kg

### DIMENSIONES

221 x 189 x 99mm.

### ACCESORIOS INCLUIDOS

- Fuente de alimentación, para la red de 95 - 240V~
- Cable de conexión para alimentar el cargador con batería externa (automóvil o similar)
- 4 Jabalinas auxiliares de acero revestido en cobre
- Conjunto de 4 cables de medición
- Extractores de jabalinas
- Bolsa para los accesorios
- Manual de operación

El fabricante se reserva el derecho de modificar estas especificaciones técnicas, sin previo aviso. Este catálogo no es un documento contractual.



**MEGABRAS INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA.**  
Rua Gibraltar, 172 - Santo Amaro - CEP 04755-070  
São Paulo - SP - Brasil  
Tel. +55 11 5641-8111 - Fax +55 11 5641-9755  
megabras@megabras.com - www.megabras.com



E04051901

Figura N°2.- Ficha técnica del telurómetro Megabras (2 de 2)

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CEU - 109- 2018**

Página : 1 de 2  
 Fecha de emisión : 2018 - 04 -02  
 Expediente : 647- 2018

1. **SOLICITANTE** : JAVIER ALEXIS PORTILLA SOCON  
 Dirección : Los Parques Del Agustino Edif. Los Sauces Nro. 301 – El Agustino – Lima – Lima.
2. **INSTRUMENTO DE MEDICIÓN** : TELURÓMETRO  
 Marca : MEGABRAS  
 Modelo : MTD20KWe  
 Serie : OL9079B  
 Alcance de Escala : 200 V AC / 20 kΩ  
 Tipo de indicación : Digital  
 Procedencia : Brasil  
 Ubicación : No Indica

3. **FECHA Y LUGAR DE MEDICIÓN.**  
 La calibración se realizó el 28 de Marzo del 2018 en el Laboratorio de Calibraciones de UNIMETRO SAC.

4. **MÉTODO.**  
 Se realizó por el método de comparación directa con patrones certificados por INACAL - DM.

5. **PATRÓN DE MEDICIÓN.**

Patrón utilizado	Marca	Modelo	Certificado	Trazabilidad
Multímetro Digital	FLUKE	289	LE - 538 - 2017	INACAL-DM
Termohigrómetro	LUFFT	OPUS 20 THI	LT - 191 - 2017	INACAL-DM

6. **CONDICIONES AMBIENTALES.**

Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	23,4 °C	23,6 °C
Humedad Relativa	62,8 %	62,5 %

7. **OBSERVACIONES:**

Los resultados de las mediciones efectuadas se muestran a partir de la página 02 del presente documento.  
 El valor indicado del equipo que se muestra en la tabla es el promedio de 5 valores medidos.  
 La incertidumbre de la medición se determinó con un factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%.  
 Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación "CALIBRADO".  
 La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.



Ing. Moisés Inga Chucos  
 Gerente de Metrología  
 Reg. CIP N° 137294

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION ESCRITA DE UNIMETRO S.A.C.

Av. Gran Chimú N° 451 Urb. Zárate, San Juan de Lurigancho - Lima  
 Telf.: 376-8271 Cel.: 998446498 Entel: 981 421 743 RPM: #998446498  
 Web: www.unimetrosac.com E-mail: ventas@unimetrosac.com / unimetrosac@hotmail.com

Figura N°3.- Certificado de calibración de Telurometro Megabras.

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CEU - 109 - 2018**

Página : 2 de 2  
 Fecha de emisión : 2018 - 04 - 02  
 Expediente : 647 - 2018

**RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN**

ALCANCE DE INDICACIÓN	INDICACIÓN DEL PATRÓN	INDICACIÓN DEL EQUIPO	ERROR	INCERTIDUMBRE	E.M.P. (±)
20	2,00 Ω	2,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,24 Ω
	10,00 Ω	10,00 Ω	0,00 Ω	0,01 Ω	0,40 Ω
	18,00 Ω	17,96 Ω	-0,04 Ω	0,01 Ω	0,56 Ω
200	20,0 Ω	19,8 Ω	-0,2 Ω	0,1 Ω	2,4 Ω
	100,0 Ω	102,4 Ω	2,4 Ω	0,1 Ω	4,0 Ω
	180,0 Ω	183,4 Ω	3,4 Ω	0,1 Ω	5,7 Ω
2000	200 Ω	197 Ω	-3 Ω	1 Ω	24 Ω
	1000 Ω	1027 Ω	27 Ω	1 Ω	41 Ω
	1800 Ω	1839 Ω	39 Ω	1 Ω	57 Ω
20	2,00 kΩ	2,01 kΩ	0,01 kΩ	0,01 kΩ	0,24 kΩ
	10,00 kΩ	10,08 kΩ	0,08 kΩ	0,01 kΩ	0,40 kΩ
	18,00 kΩ	17,64 kΩ	-0,36 kΩ	0,01 kΩ	0,55 kΩ

**MEDICIÓN DE TENSIÓN AC a 60 Hz**

ALCANCE DE INDICACIÓN	INDICACIÓN DEL PATRÓN	INDICACIÓN DEL EQUIPO	ERROR	INCERTIDUMBRE	E.M.P. (±)
200	20,0 V	20,1 V	0,1 V	0,1 V	2,4 V
	100,0 V	101,0 V	1,0 V	0,1 V	4,0 V
	180,0 V	182,1 V	2,1 V	0,1 V	5,6 V

E.M.P.: Error máximo permitido

FIN DEL DOCUMENTO



PROHIBIDA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION ESCRITA DE UNIMETRO S.A.C.

Av. Gran Chimú N° 451 Urb. Zárate, San Juan de Lurigancho - Lima  
 Telf.: 376-8271 Cel.: 998446498 Entel: 981 421 743 RPM: #998446498  
 Web: www.unimetrosac.com E-mail: ventas@unimetrosac.com / unimetrosac@hotmail.com

Figura N°4.- Certificado de calibración de Teluometro Megabras.



Figura N°5.- Telurometro Megabras



Figura N°6.- Almacenamiento de los materiales a usar en el experimento en campo: 01 bolsa de cemento conductor Thor Cem de 25kg , 03 bolsas de bentonita de 30 kg y 02 bolsas de sal industrial de 50 kg.



Figura N°7.- Cemento conductivo THOR CEM



Figura N°8.- Bentonita



Figura N°9.- Sal industrial



Figura N°10.- Variación de la resistencia cuando varía la longitud enterrada del electrodo



Figura N°11.- Instalación de electrodo de 5/8" con 2" de diámetro y 1 m de largo del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo.



Figura N°12.- Instalación de electrodo de 5/8" con 4" de diámetro y 1 m de largo del cilindro formado por el cemento conductivo alrededor del electrodo.



Figura N°13.- Excavación de la zanja de dimensiones 2m x 1m x 0.5 m para realizar la prueba con bentonita.



Figura N°14.- Medición de resistividad con el Teluometro Megabras para la prueba de bentonita.



Figura N<sup>o</sup>15.- Excavación de la zanja de dimensiones 2m x 1m x 0.5 m para realizar la prueba con sal industrial.



Figura N<sup>o</sup>16.- Medición de resistividad con el Telurometro Megabras para la prueba de sal industrial.