
Medición de la Resistividad de los Suelos

Prof. Claudio González Cruz
Serie de Apuntes Técnicos
SAT-ELEC02-2025
Edición 2025

La resistividad de los suelos depende de múltiples factores, razón por la cual, ésta debe determinarse para proponer la configuración del sistema de puesta a tierra más favorable para el emplazamiento elegido. Uno de los métodos eléctricos mayormente utilizado en el estudio de terrenos, “es el de los cuatro electrodos”, el cual consiste en inyectar una corriente alternada al terreno mediante un par de electrodos, y medir la diferencia de potencial que se produce entre otros dos.

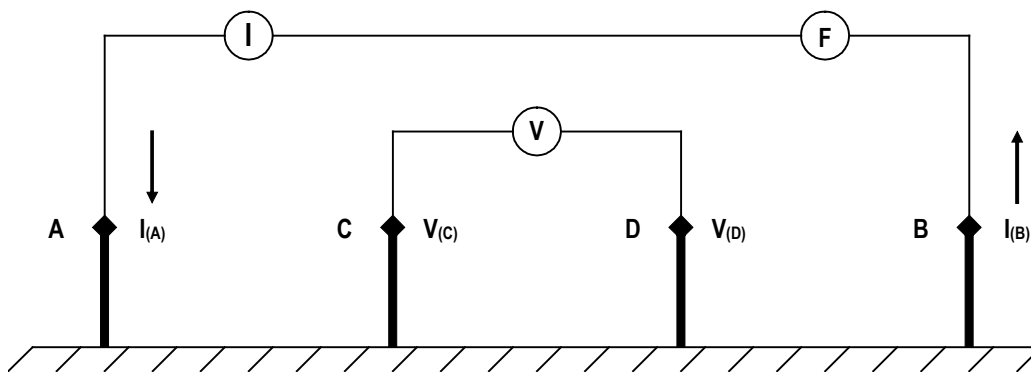


Figura 1 – Esquema general de medición del método de los cuatro electrodos

Al inyectar una corriente eléctrica a un terreno por medio de un electrodo, se formará un campo eléctrico semiesférico en el suelo.

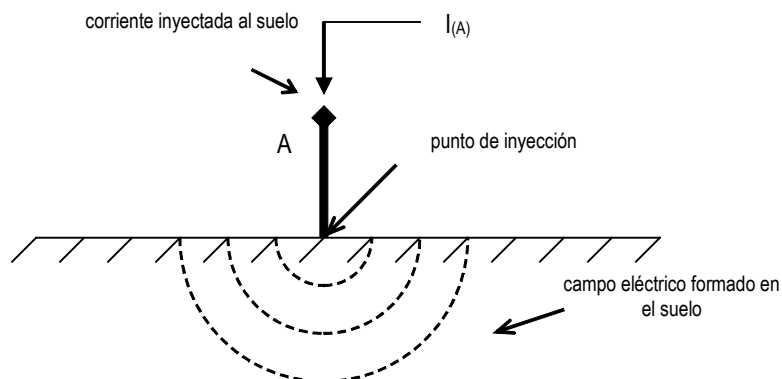


Figura 2 – Campo eléctrico semiesférico producido por un electrodo en el suelo

El potencial del campo eléctrico en un punto cualquiera del terreno $V_{(x)}$ dado por la corriente $I_{(A)}$ inyectada en el suelo por el electrodo, se obtiene de la expresión:

$$\frac{I_{(A)}}{2\pi x^2} = \frac{V_{(x)}}{\rho} \Rightarrow V_{(x)} = \frac{\rho I_{(A)}}{2\pi x^2}$$

Si ubicamos un par de electrodos dentro del campo eléctrico mostrado en la figura 2 separados a una distancia “x” entre ellos y respecto al de inyección, podremos determinar la diferencia de potencial que se produciría entre ellos.

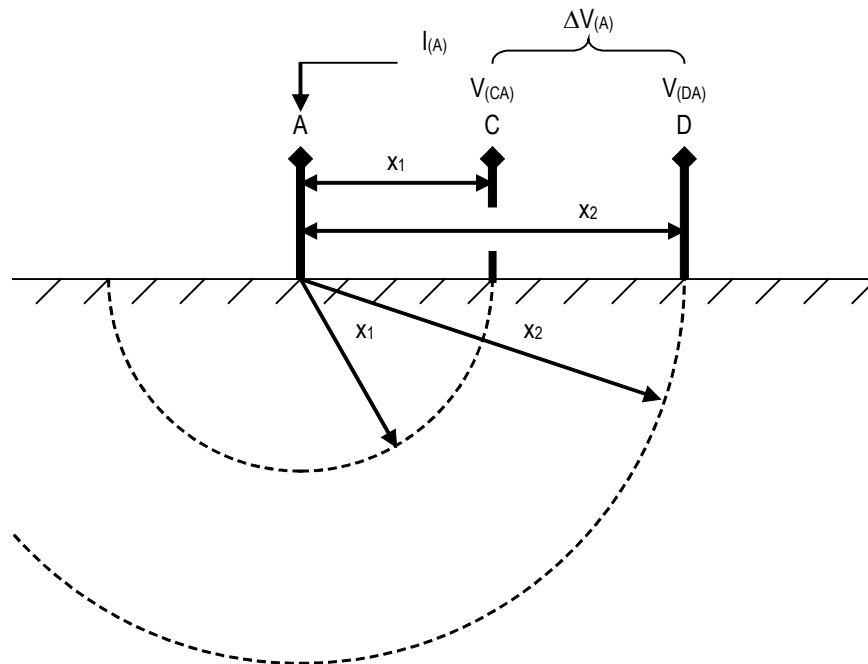


Figura 3 – Diferencia de potencial entre dos electrodos dada por un inductor “A”

La diferencia de potencial $\Delta V_{(A)}$ entre los electrodos C y D dada por la corriente $I_{(A)}$ estaría determinada por:

$$\Delta V_{(A)} = \int_{x_1}^{x_2} V_{(x)} dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho I_{(A)}}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho I_{(A)}}{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x^2} dx = \frac{\rho I_{(A)}}{2\pi} \left(\frac{-1}{x} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} = \frac{\rho I_{(A)}}{2\pi} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$$

Si ahora instalamos otro electrodo inductor en el terreno denominado “B”, ubicado a una distancia “x” respecto al primer inductor usado (A), y aplicando análogamente las consideraciones anteriores, tendríamos que aparecería una diferencia de potencial entre los electrodos “C” y “D” ahora dada por la corriente inyectada por el nuevo electrodo (I_B).

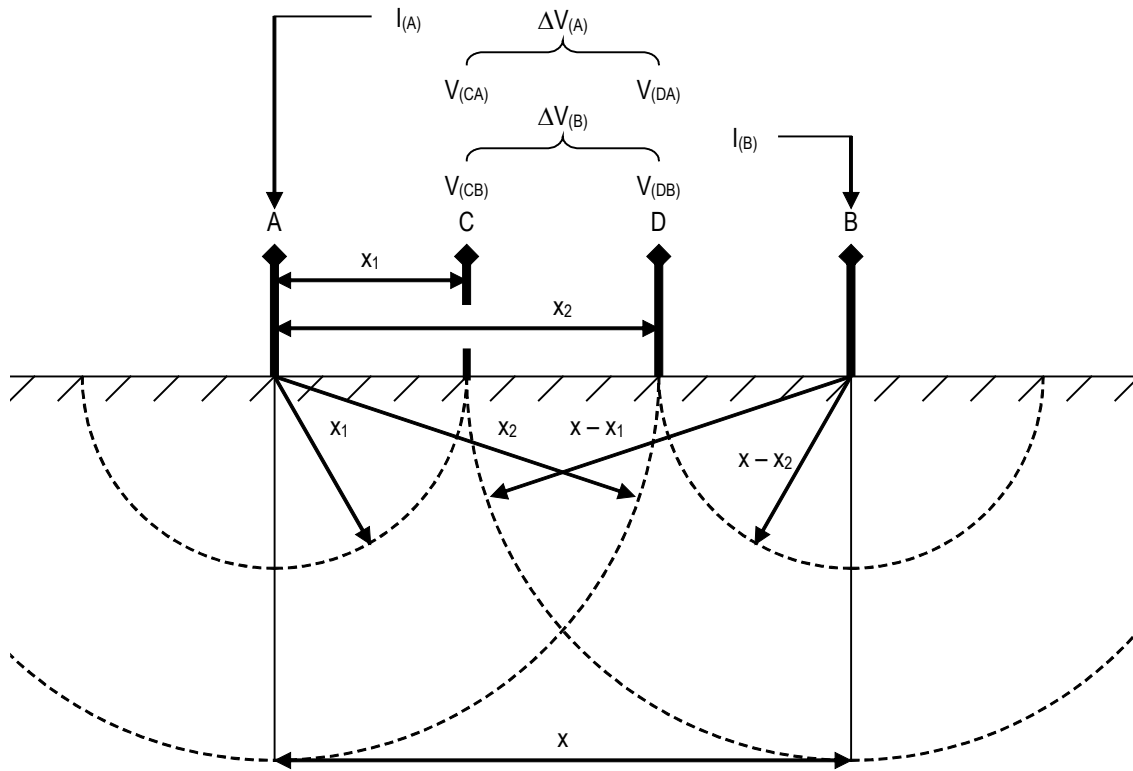


Figura 4 – Diferencia de potencial entre dos electrodos dada por un inductor “B”

La diferencia de potencial $\Delta V_{(B)}$ entre los electrodos C y D dada por la corriente $I_{(B)}$ estaría determinada por:

$$\Delta V_{(B)} = \int_{x_1}^{x_2} V_{(x)} dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho I_{(B)}}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho I_{(B)}}{2\pi} \int_{x-x_2}^{x-x_1} \frac{1}{x^2} dx = \frac{\rho I_{(B)}}{2\pi} \left(\frac{-1}{x} \right) \Big|_{x-x_2}^{x-x_1} = \frac{\rho I_{(B)}}{2\pi} \left(\frac{1}{x-x_2} - \frac{1}{x-x_1} \right)$$

Si conectamos un voltímetro entre los electrodos “C” y “D” que registre la diferencia de potencial total existente entre ellos dada por los aportes alternados de los inductores “A” y “B” considerando que ellos aportan la misma corriente “I”, pero con sentidos apuestos, podemos deducir la expresión final aplicada al método de los cuatro electrodos.

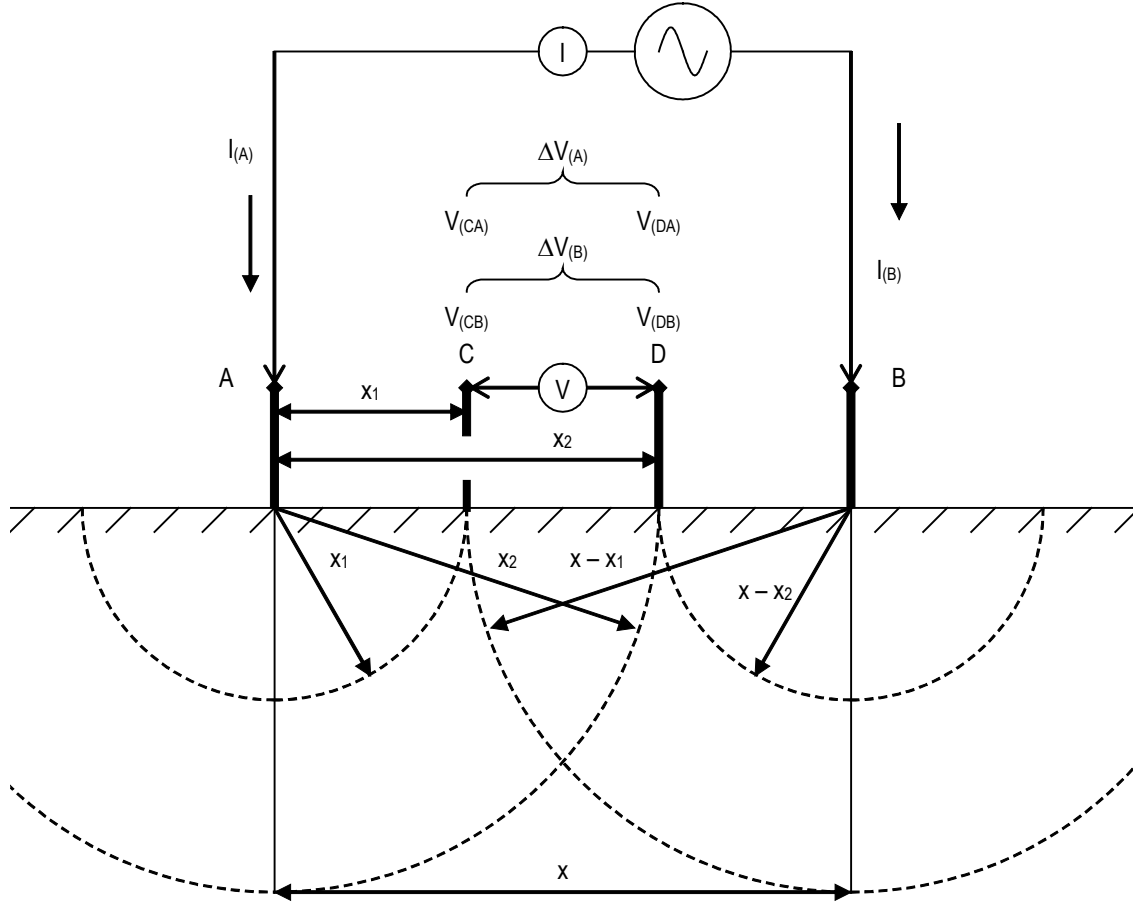


Figura 5 – Determinación de la ecuación general del método de los cuatro electrodos

$$I_{(A)} = I \wedge I_{(B)} = -I \rightarrow \Delta V_{(CD)} = V = \Delta V_{(A)} - \Delta V_{(B)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) + \left(\frac{1}{x - x_2} - \frac{1}{x - x_1} \right) \right]$$

Finalmente despejando, y considerando que $R=V/I$, se obtiene la ecuación fundamental para la obtención de la resistividad mediante el método de los cuatro electrodos:

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) + \left(\frac{1}{x - x_2} - \frac{1}{x - x_1} \right)} \right]$$

Si la medida de terreno se efectúa en un medio homogéneo, entonces el valor de resistividad obtenido mediante la expresión anterior corresponderá al valor único de resistividad presente en el suelo. Si el medio no es homogéneo, el valor de la resistividad tendrá un valor ficticio, que no corresponderá en general, a ninguna de las resistividades presentes en el suelo, sino a una cierta combinación de ellas. A este valor ficticio de resistividad se le llama resistividad aparente.

La forma en cómo se desplazan los electrodos en el terreno para la obtención de las muestras de resistividad aparente determina la configuración implementada, siendo las más difundidas la de Wenner y la de Schlumberger.

En la configuración de Wenner, los cuatro electrodos ubicados sobre una línea recta están separados a una misma distancia “A” entre ellos.

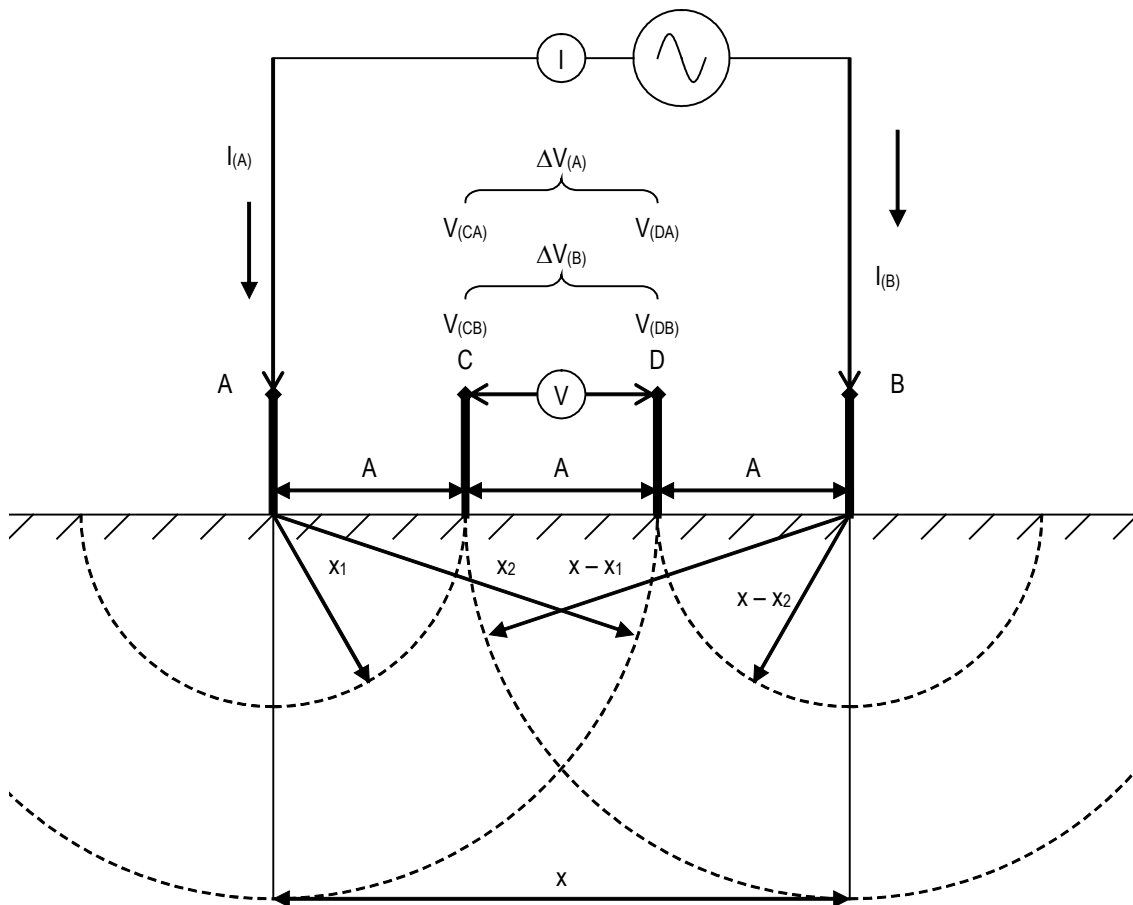


Figura 6 – Método de los cuatro electrodos según Wenner

Analizando el esquema dado en la figura 6, tendríamos las siguientes igualdades:

$$x_1 = A$$

$$x_2 = 2A$$

$$x = 3A$$

Reemplazando las igualdades anteriores en la ecuación fundamental para la obtención de la resistividad mediante el método de los cuatro electrodos se tiene finalmente que:

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2}\right) + \left(\frac{1}{x - x_2} - \frac{1}{x - x_1}\right)} \right]$$

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{A} - \frac{1}{2A}\right) + \left(\frac{1}{3A - 2A} - \frac{1}{3A - A}\right)} \right]$$

$$\rho_{AW} = 2 \times \pi \times R \times A$$

ρ_{AW} : Resistividad aparente del terreno en un punto específico según Wenner ($\Omega \times m$).

R : Valor de la resistencia indicada por el instrumento de medición (Ω).

A : Separación utilizada entre electrodos de medición (m).

Para el caso de la configuración de Schlumberger, los dos electrodos de potencial se disponen simétricamente con respecto al centro de medición elegido, a una distancia de separación entre ellos denominada “a”. Los electrodos de corriente se ubican también simétricamente con respecto al centro de medición y a una distancia de él variable denominada “L”. Durante la serie de medidas, los electrodos de potencial permanecen fijos, trasladándose sólo los de corriente.

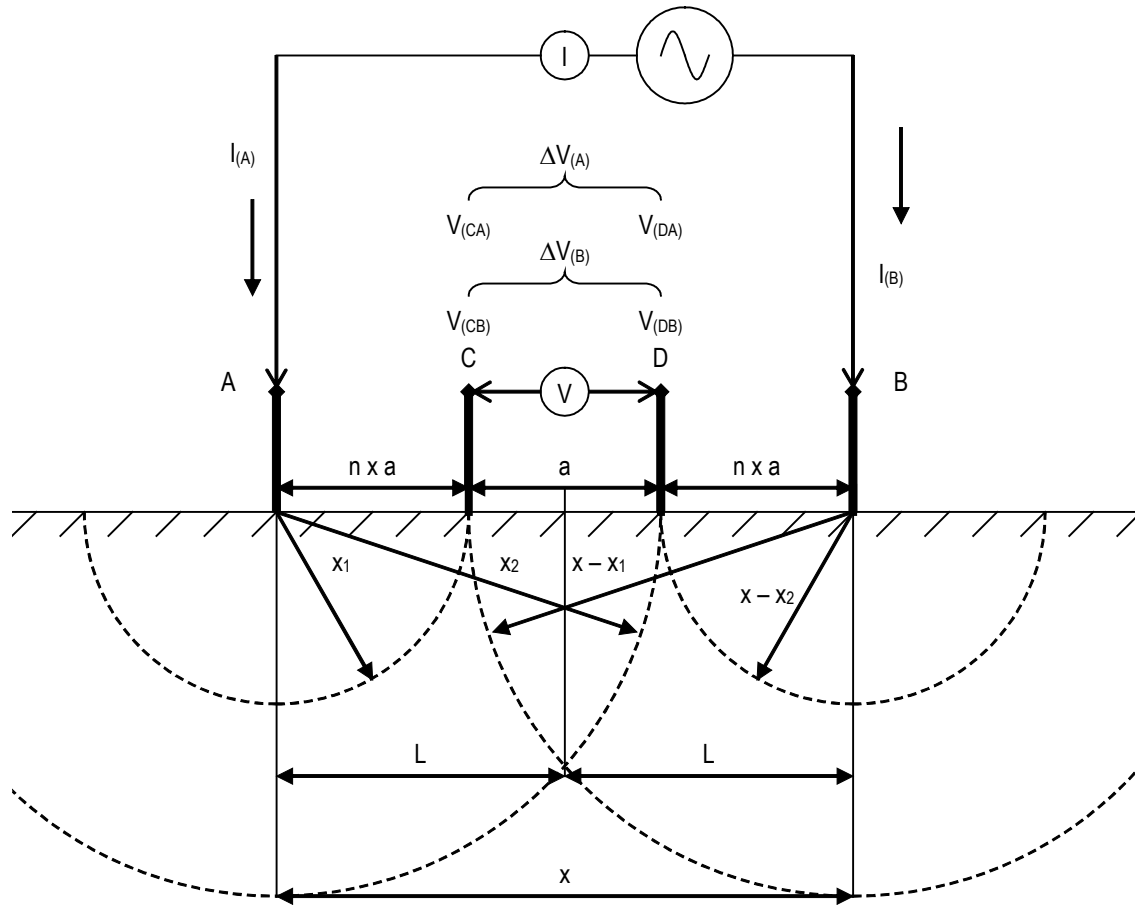


Figura 7 – Método de los cuatro electrodos según Schlumberger

Analizando la figura 7 podemos determinar la existencia de las siguientes igualdades:

$$x_1 = n \times a$$

$$x_2 = n \times a + a = a \times (n + 1)$$

$$x = n \times a + a + n \times a = a \times (2n + 1)$$

Utilizando las igualdades anteriores en la expresión general de la resistividad aparente, encontraremos la ecuación particular para el caso de la configuración de Schlumberger:

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{n \times a} - \frac{1}{a \times (n+1)} \right) + \left(\frac{1}{a \times (2n+1) - a \times (n+1)} - \frac{1}{a \times (2n+1) - n \times a} \right)} \right]$$

$$\rho = 2 \times \pi \times R \times \left[\frac{1}{\left(\frac{2}{a \times n \times (n+1)} \right)} \right]$$

$$\rho_{ASH} = \pi \times R \times a \times n \times (n+1)$$

ρ_{ASH} : Resistividad aparente del terreno en un punto específico según Schlumberger ($\Omega \times m$).

R : Valor de la resistencia indicada por el instrumento de medición (Ω).

n : Variable auxiliar de cálculo.

a : Separación utilizada entre electrodos de potencial (m).

Observando la figura 7, se deduce que el valor “n” de la expresión anterior se obtiene con la ecuación siguiente:

$$L = n \times a + \frac{a}{2}$$

$$n = \frac{(2 \times L) - a}{2 \times a}$$

n : Variable auxiliar de cálculo.

L : Distancia entre el centro de medición y el electrodo móvil de corriente.

a : Separación utilizada entre electrodos de potencial (m).

Para la realización del sondeo de terrenos o también llamado sondeo eléctrico vertical (SEV), mediante la configuración de Wenner o Schlumberger, se debe elegir un eje de medición sobre una línea recta, en una dirección tal, que no existan obstáculos importantes (rocas, árboles, edificios, matorrales, etc.), y sobre este eje establecer un centro de medición mediante un electrodo auxiliar o una estaca.

De no ser posible la disposición en recta, se sugiere que se dispongan sobre una misma línea de nivel, si la medición se está efectuando en un cerro o lomaje, o bien, si algún obstáculo sobre un terreno llano impide cumplir esta condición la medición puede hacerse sobre dos rectas que formen un ángulo no mayor de 15° , con vértice en el centro de medición.

En lo posible se deben realizar las mediciones de terreno directamente en el sitio donde se construirá la puesta a tierra, preferentemente una vez que el terreno haya sido despejado y llevado a su condición definitiva después de las faenas de movimiento de suelo. Si esto no es posible, en concordancia con lo señalado en el RIC N°6 (Anexo 6.6), debe elegirse un área lo más próxima posible a dicha zona.

Para la ejecución de las mediciones, el instrumento a utilizar según la Norma Técnica Vigente, debe ser un equipo denominado geómetro de cuatro terminales y deberá tener como requisito una escala mínima de $1\ \Omega$, con una resolución no mayor de $0,01\ \Omega$ y una escala máxima no inferior a $100\ \Omega$.



Figura 8 – Ejemplo de instrumento de medición

Se exigen en Chile, alas de medición de hasta 100 mts. Si no se dispone de terreno como para obtener un ala de 100 mts, serán aceptables mediciones con alas de 50 mts y excepcionalmente, por condiciones extremas, se aceptarán alas de hasta 30 m.

Para la separación “A” de Wenner y “L” de Schlumberger se utiliza normalmente la siguiente secuencia en metros: 0,6 – 0,8 – 1,0 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 4,0 – 5,0 – 6,0 – 8,0 – 10,0 – 16,0 – 20,0 – 25,0 – 30,0 – 40,0 – 50,0 – 60,0 – 80,0 – 100,0. En el caso de la configuración de Schlumberger, la separación “a” entre electrodos de potencial permanece fija en 1 metro, 3 metros o 5 metros, según las condiciones particulares de la medición.

Por la facilidad de implementación que ofrece la configuración de Schlumberger respecto a la de Wenner, en Chile generalmente se utiliza dicha configuración para el SEV. Al ir al terreno, es recomendable contar con formularios de formato estándar para tomar nota de los datos obtenidos durante la ejecución de las mediciones.

Hoja de Terreno			
Nombre del Proyecto		:	
Lugar de Medición		:	
Fecha		:	
Condiciones Climáticas		:	
Instrumento Utilizado		:	
Escala del Instrumento		:	
N° de Orden	Separación "L" (m)	Separación "a" (m)	Resistencia Medida (Ω)
1	0,6	1	
2	0,8	1	
⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓
21	100	1	

Según lo indicado al inicio de esta sección, la medición de terreno arroja el valor de resistencia de distintos puntos del terreno según una separación dada entre los electrodos de medida. Esta resistencia (R), y la separación de electrodos de potencial (a), y corriente (L), deben insertarse en la expresión particular de la resistividad aparente de la configuración de Schlumberger.

En esta parte del proceso se debe confeccionar el denominado tablero de valores, el que es parte integrante del informe técnico de sondeo de terreno. Un ejemplo del tablero de valores utilizado para la configuración de Schlumberger, se entrega a continuación:

N° de Orden Medición	N° de Orden Lecturas	Separación "a" (m)	Separación "L" (m)	Variable auxiliar n	Resistencia "R" (Ω)	Resistividad "ρ" ($\Omega \times m$)
1	1	1,0	0,6			
	2	1,0	0,8			
	3	1,0	1,0			
	4	1,0	1,6			
	⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓	⋮ ↓
	21	1,0	100			

Referencias Bibliográficas

Pliego Técnico Normativo RIC N°6 (2020)

Puesta a Tierra y Enlace Equipotencial
Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC)

IEEE Std 81-2012 (2012)

Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Instalaciones de Puesta a Tierra (2007)

Del Alamo, J.C.
Editorial Marcombo

Electrical Methods in Geophysical Prospecting (1996)

Keller, G.V. & Frischknecht, F.C.
Pergamon Press

Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas (1997)

José Toledano Gasca – Juan Martínez Requena
Editorial Paraninfo

Distribución Industrial de la Energía (1996)

Mario Lillo Saavedra
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción.

Sistemas de Puesta a Tierra (1999)

Claudio González Cruz
Departamento de Capacitación, Legrand Chile