



- **PROYECTO E INSTALACIÓN DE PROTECCIONES CERÁMICAS Y TOMAS DE TIERRA.**
- **PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS.**
- **CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y FILTRADO DE ARMÓNICAS.**
- **ESTUDIOS Y MEDICIONES DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.**
- **INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES.**



D.L.Y. SERVICIOS

- PROYECTO E INSTALACIÓN DE PROTECCIONES CERÁMICAS Y TOMAS DE TIERRA.
- PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS.
- CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y FILTRADO DE ARMÓNICAS.
- ESTUDIOS Y MEDICIONES DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.
- INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES.

www.dlyservicios.com.ar

[e-mail: info@dlyservicios.com.ar](mailto:info@dlyservicios.com.ar)

BLOCK A DEPTO. 6 P.B. – Bº 101 DEPTOS. – TEL./FAX: 03875-424262. – TARTAGAL (A4560DVS). SALTA

CURSO TEÓRICO PRÁCTICO SOBRE MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA CON TELURÍMETRO

AUTOR: **MANUEL D. VARELA**

ÍNDICE

1. DEFINICIONES BÁSICAS

1.1 EL SUELO

1.2 LA RESISTIVIDAD

2 VOCABULARIO TÉCNICO A UTILIZAR EN LO QUE SIGUE

2.1 GENERAL

2.2 SUELO

2.3 TIERRA DE REFERENCIA (SEN)

2.4 ELECTRODO DISPERSOR

2.5 CONEXIÓN A TIERRA

2.6 RESISTIVIDAD DEL SUELO

2.7 RESISTENCIA DEL ELECTRODO DISPERSOR

3 CAMPO GENERADO EN EL SUELO POR LA CIRCULACIÓN DE UNA CORRIENTE

4. TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA Y DE LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS

4.1 TEORÍA UNIFICADA

4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE UNA TOMA DE TIERRA

4.2.1 General

4.2.2 Teoría de la medición de la $R_{P.A.T}$

4.2.3 Medición de la resistividad de un suelo por el método de Wenner

5. MEDIDORES DE TIERRA

5.1 GENERAL

5.2 CIRCUITO BÁSICO DEL TELURÍMETRO

5.3 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE UNA P.A.T. CON EL TELURÍMETRO

5.4 VARIACIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL ÁMBITO DE LA MEDICIÓN

6. ALGUNOS PROBLEMAS QUE PRESENTA LA MEDICIÓN DESCRIPTA EN 5.3 (SOLUCIÓN PRÁCTICA)

6.1 GENERAL

6.2 EL MÉTODO DE LOS ELECTRODOS VIRTUALES

6.3 LA MEDICIÓN POR TRIANGULACIÓN

6.3.1 El telurímetro como medidor de resistencias

6.3.2 El método de triangulación

6.4 EL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN DE UNA MALLA EXTENDIDA

6.4.1 General

6.4.2 Alejamiento del electrodo de inyección

6.4.3 Método de las aproximaciones sucesivas

6.4.4 Otro enfoque de la medición

MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA CON TELURÍMETRO

1. DEFINICIONES BÁSICAS

1.1 EL SUELO

Llamamos suelo al **conjunto de materiales que conforma la superficie de nuestro planeta**. En todo lo que sigue lo consideramos **homogéneo e isótropo**, vale decir que sus propiedades son las mismas en todas direcciones, simplificación hecha al solo efecto de dar validez a las fórmulas que manejaremos en nuestra teoría.

1.2 LA RESISTIVIDAD

Es la **resistencia específica o unitaria del suelo**. Se simboliza con la letra griega ρ (Rho) y se expresa en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$). En nuestra hipótesis es, por 1.1, la misma en todas direcciones.

2. VOCABULARIO TÉCNICO A UTILIZAR EN LO QUE SIGUE

2.1 GENERAL

Para dejar bien definidos los términos que usaremos en lo que sigue nos adherimos a lo establecido en las normas alemanas **VDE 0100/11.58 capítulo II, Párrafo 3 N, incisos e y g** y las italianas **CEI n 11-8, fascículo N176, edición 1962, capítulo I, sección 2**.

2.2 SUELO

Es el conjunto de materiales que conforman la superficie terrestre (terreno) en contacto directo con la puesta a tierra (P.A.T.). Está compuesto, en su mayor proporción, por diferentes porcentajes de: la **roca madre** que lo genera, los **productos** de su composición (**regolita**), **humus, agua y aire**, que ocupan sus **intersticios libres**.

2.3 TIERRA DE REFERENCIA (SEN)

Es un área de terreno, en particular de su superficie, la cual está tan alejada del electrodo dispensor (ver 2.4) que no existen diferencias de potencial entre dos puntos de ella cuando circula corriente por este.

La Figura 1 muestra en (a) el concepto siguiendo la teoría del electrodo hemisférico que usaremos en lo que sigue y en (b) la ilustración empleada por la **Norma VDE 0100/11.53**.

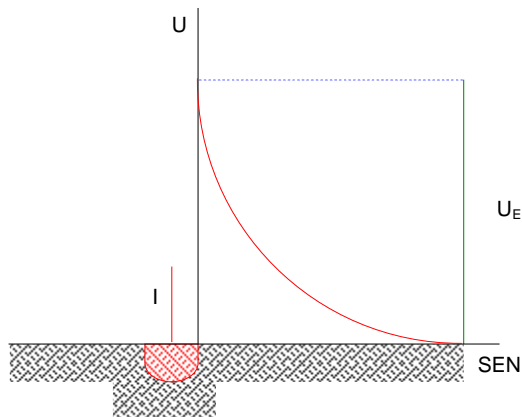


Figura 1a
SEN o tierra de referencia según electrodo hemisférico.
 U_E : Tensión en electrodo dispersor

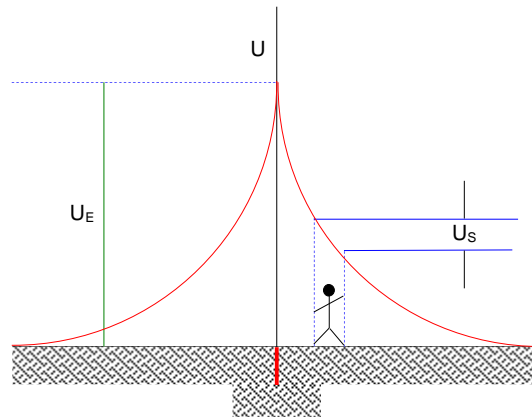


Figura 1b
SEN según la norma VDE 0100 / 11.53.
 U_s : Tensión de paso.

2.4 ELECTRODO DISPERSOR

Llamamos electrodo dispersor o electrodo de toma de tierra a *cualquier conductor enterrado que hace contacto directo con el suelo.*

Es importante destacar, *dada la situación especial del electrodo y suelo directamente influenciado por el mismo*, que para el dispersor en su conjunto no vale el efecto pelicular del conductor mismo por lo que tanto la resistencia como la impedancia del mismo tienen comportamiento diferente al del conductor en el aire.

La definición dada es de **carácter general** por lo que podemos distinguir en una construcción:

Electrodos o tomas de tierra naturales:

Cuando los conductores son instalados con una finalidad diferente a la de toma de tierra como cañerías metálicas de todo tipo, hierro estructural del **hormigón armado**, etc.

Electrodos o tomas de tierra dedicados:

Cuando estos son instalados con la **finalidad específica** de servir a la **toma de tierra**.

En toda red de toma de tierra se considera que forma parte de la misma todo elemento en que se produce la asociación **suelo-metal** y se elimina de su consideración la parte aislada de los mismos.

2.5 CONEXIÓN A TIERRA

Es un conductor que **conecta la parte de la instalación que se quiere poner a tierra con el dispersor**. Se diferencia de este en que *no está enterrado* y, si lo está, es *aislado* o sea que en este conductor no hay asociación suelo-metal.

2.6 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Resistividad aparente o equivalente de un suelo; es la resistencia eléctrica específica o volumétrica del mismo. Se expresa, en general, en ohmios por **metro cuadrado / metro** o sea:

$$\frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$$

y representa la resistencia que existe entre dos caras opuestas de un cubo de suelo de un metro de arista. Se representa por la letra griega ρ (Rho). A veces suele expresarse en $\Omega \cdot \text{cm.}$, magnitud que resulta **100 veces mayor que la anterior**.

2.7 RESISTENCIA DEL ELECTRODO DISPERSOR

También definida como resistencia de dispersión de la toma de tierra. **Es la resistencia del suelo entre el electrodo dispersor y el SEN** (*suelo eléctricamente neutro*).

3. CAMPO GENERADO EN EL SUELO POR LA CIRCULACIÓN DE UNA CORRIENTE

Supongamos que sobre un punto de la superficie de un determinado suelo se inyecta una corriente I (Figura 2). Dada la condición establecida en 1.1 esta corriente se expande en el cuerpo del suelo de manera uniforme en todas direcciones y a una distancia a la densidad de corriente será:

$$\frac{1}{S \cdot a} = \frac{I}{2\pi \cdot a^2} \quad (1)$$

en la que:

d_i = Corriente específica

I = Corriente inyectada

$2\pi \cdot a^2$ = Superficie de la semiesfera que ha generado la corriente al desplazarse en el suelo que cumple la condición 1.1.

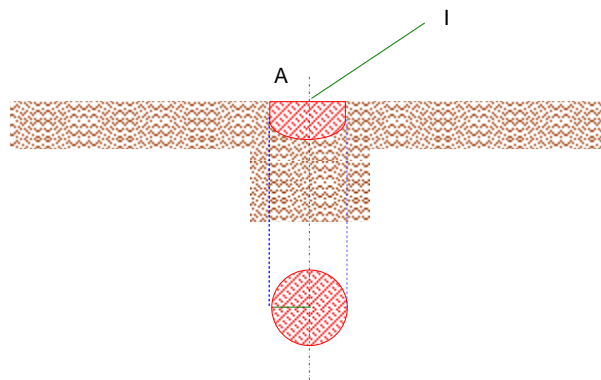


Figura 2: Inyección sobre un electrodo

Si suponemos, para evitar complicaciones que se nos presentan más adelante, que la semiesfera anterior es metálica, nada cambia y nos hallamos frente al caso de un electrodo semiesférico de radio “ a ” por el cual inyectamos en el suelo una corriente I , uniformemente distribuida.

Al recorrer el suelo de resistividad ρ la corriente va generando un campo $\mathbf{E}_{(x)}$ que se expresa por la ley de Ohm microscópica:

$$E_{(x)} = \rho \cdot \delta_{i(x)} \quad (2)$$

ρ es invariable por la condición 1.1 por lo que las superficies equipotenciales de este campo son semiesferas concéntricas con el electrodo. Las líneas de fuerza serán, por definición de campo, perpendiculares a estas semiesferas. La Figura 3 ilustra la situación.

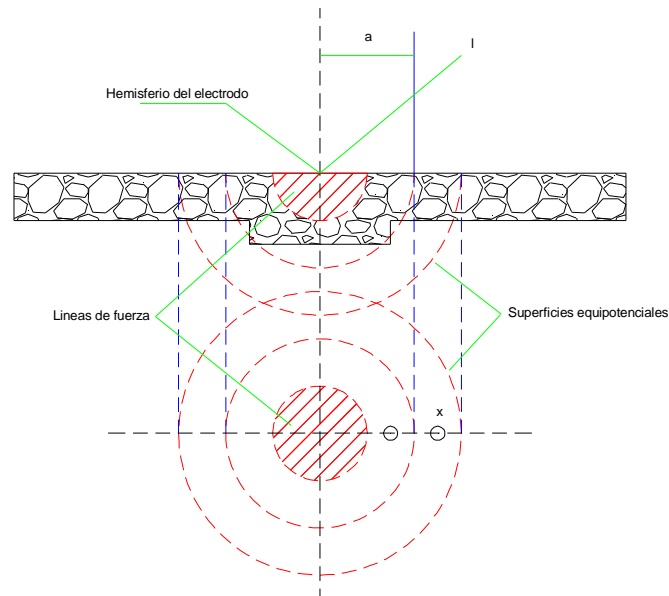


Figura 3: Electrodo y Campo

Tomando como origen de coordenadas el centro del electrodo hemisférico la diferencia de potencial U_{1-2} entre dos puntos de coordenadas x_1 y x_2 en este campo será:

$$U_{1-2} = V_1 - V_2 = V_{x1} - V_{x2}$$

$$U_{1-2} = \int_{x2}^{x1} E_x \cdot dx$$

Reemplazando E_x por su valor en la ecuación (2) tenemos:

$$U_{1-2} = \rho \int_{x2}^{x1} \delta_{i(x)} \cdot dx$$

Pero $\delta_{i(x)}$ es la corriente específica en que uniformemente se distribuye I en la semiesfera correspondiente. Por lo tanto:

$$U_{12} = \rho \int_{x2}^{x1} \frac{I}{2} \pi \cdot x^2 \cdot dx$$

finalmente:

$$U_{1-2} = \rho \cdot \frac{I}{2} \pi \left(\frac{1}{x1} - \frac{1}{x2} \right) \quad (3)$$

Si hacemos coincidir x_1 , con "a", radio del electrodo hemisférico y dejamos variar x_2 tendremos que la (3) se transforma en:

$$U_{ax} = \frac{\rho I}{2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{x}\right)} \frac{\rho I}{2\pi a \left(1 - \frac{a}{x}\right)} \quad (4)$$

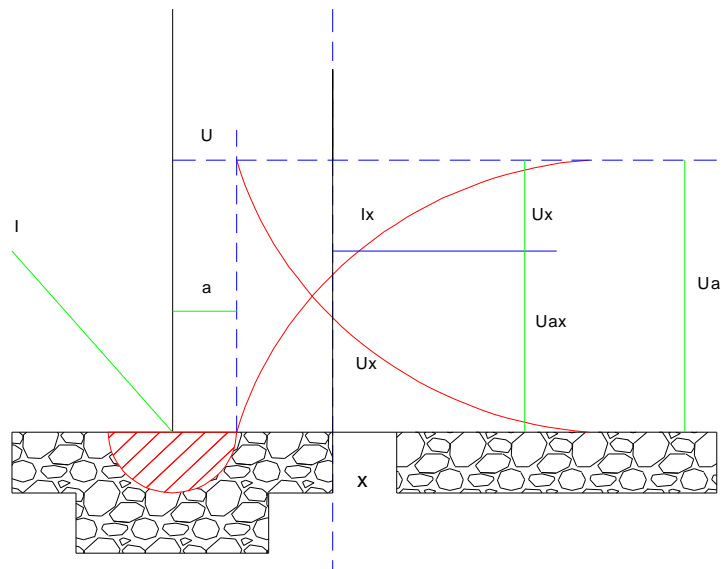
Definimos como **potencial absoluto** de nuestro electrodo al que tiene con respecto al **SEN** (*Suelo Eléctricamente Neutro*) que hemos definido en 2.3 o sea con respecto al potencial del globo terráqueo tomado como cero de referencia. La fórmula (4) permite calcular ese potencial:

$$U_a = \lim . (U_{ax}) = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (5)$$

Definimos como **resistencia de dispersión R_d** o resistencia de puesta a tierra (**$R_{P.A.T.}$**) a la relación entre U_a y la corriente I que la genera. La hemos caracterizado en 2.7:

$$R_d = R_{pat} = \frac{U_a}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (6)$$

Podríamos hacer consideraciones similares con respecto a la variación de la corriente para obtener la expresión de su valor en un punto dado. La Figura 4 muestra la marcha de ambas curvas.



U_a = Potencial Absoluto del electrodo

U_x = Ídem del punto x

U_{ax} = Diferencias Absolutas entre electrodo y x

Figura 4: Marcha de corriente y tensión

Cabe destacar que al variar x la expresión (5) es del tipo

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot x \cdot \frac{I}{x} \cdot \frac{k}{x}$$

Que es la ecuación de la hipérbola equilátera referida a sus asíntotas tomadas como ejes cartesianos. Esto nos permite asegurar que U_x es tangente en el infinito con la referencia de tierra como se ve en la Figura 4. Esto nos dice que el SEN teórico está en el infinito.

La Figura 5 aclara conceptos mediante tres voltímetros ficticios que nos permiten anotar:

$$U_a = U_{ax} + U_x \quad (7)$$

De la (7) podemos despejar el potencial del valor absoluto (Referido al SEN) U_x de un determinado punto x:

$$U_x = U_a - U_{ax} \quad (8)$$

o sea, de (5) y (4):

$$U_{ax} = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{2\pi a} \left(1 - \frac{a}{x}\right) = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{x}$$

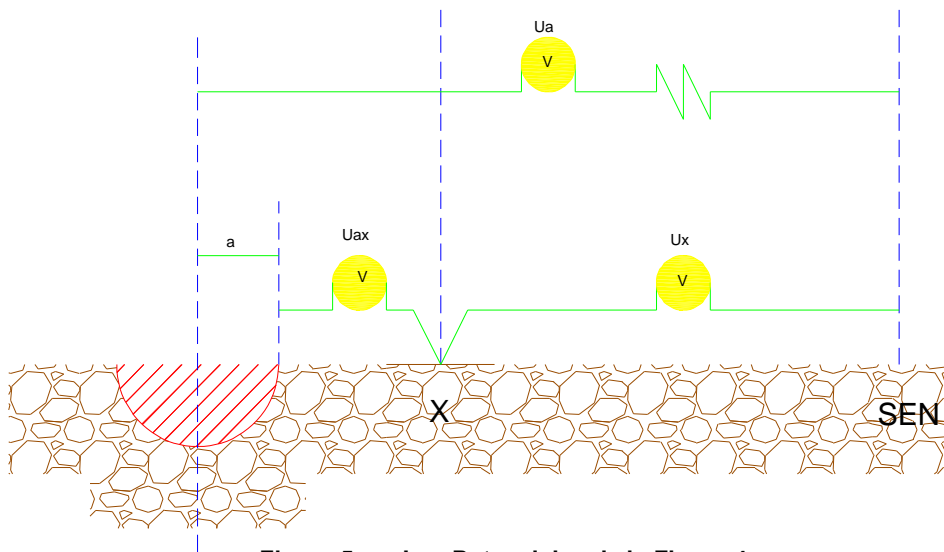


Figura 5: Los Potenciales de la Figura 4

4. TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA Y DE LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS

4.1 TEORÍA UNIFICADA

Seguiremos para el desarrollo de esta teoría con el mismo suelo homogéneo e isótropo definido en 1.1. Supongamos que en este suelo colocamos un **electrodo semiesférico** como el definido en 1.2. que llamaremos C_1 , (Ver figura 6) y otro igual que llamaremos C_2 situado a una distancia D del mismo. Si conectamos sobre estos dos electrodos una fuente de tensión alterna E se cerrará el circuito a través del suelo y se generará una corriente alternada I , que supondremos de entrada, en un momento dado sobre el electrodo C_1 e I' , de salida, en C_2 . Evidentemente se deberá cumplir que:

$$I = I' \quad (10)$$

Supongamos que, además de estos dos electrodos que llamamos de corriente, colocamos otros dos P_1 y P_2 , que llamamos sondas de tensión.

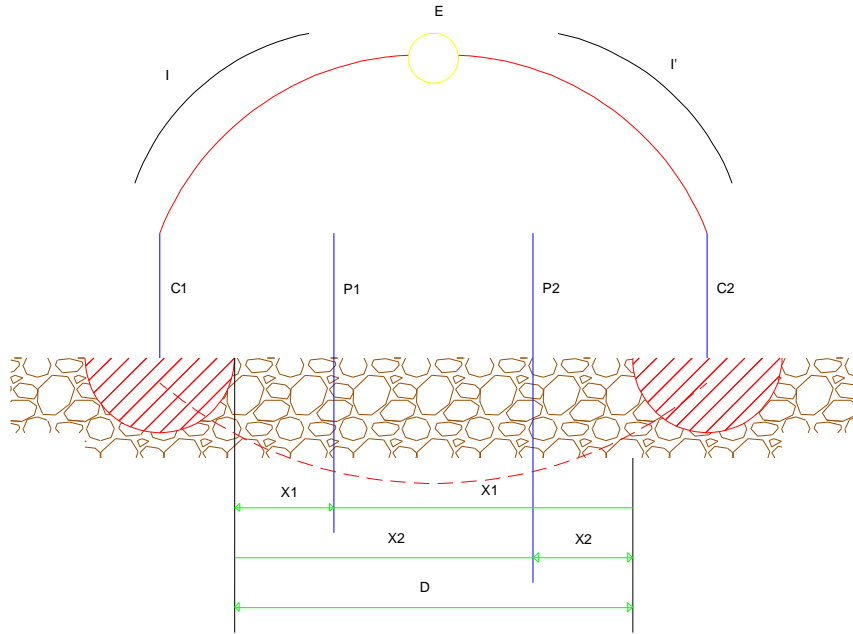


Figura 6: Los electrodos de la Teoría Unificada

De acuerdo con lo expuesto más arriba y a lo ilustrado en las Figuras 4 y 5, estas corrientes generarán en los puntos **P₁** y **P₂** los siguientes potenciales absolutos:

La corriente **I**:

$$V_{P1} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{X_1} \quad (11)$$

$$V_{P2} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{X_2} \quad (12)$$

y la corriente **I'**:

$$V'_{P1} = \frac{\rho I'}{2\pi} \cdot \frac{1}{X'_1} \quad (13)$$

$$V'_{P2} = \frac{\rho I'}{2\pi} \cdot \frac{1}{X'_2} \quad (14)$$

Sumando los potenciales absolutos en ambos puntos **P₁** y **P₂** y explicitando lo expresado por (10) tendremos:

$$V_{TP1} = V_{P1} + V'_{P1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} \right) \quad (15)$$

La diferencia de potenciales entre los puntos **P₁** y **P₂** será:

$$V_{TP2} = V_{P2} + V'_{P2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X_2} - \frac{1}{X'_2} \right) \quad (16)$$

que se expresa

$$U_{1-2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X_1} - \frac{1}{X'_1} - \frac{1}{X_2} - \frac{1}{X'_2} \right) \quad (17)$$

Esta ecuación cuya generalidad se ha procurado mantener en todo el desarrollo nos servirá para razonar sobre los métodos de medición de la resistencia y de resistividad de los suelos.

4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE UNA TOMA DE TIERRA

4.2.1 General

Sea el electrodo hemisférico de radio a de la Figura 1. Nuestro problema consiste en medir la resistencia de dispersión o resistencia de puesta a tierra ($R_{P.A.T.}$) según los términos definidos en 2.7

4.2.2 Teoría de la medición de la $R_{P.A.T.}$

Según la ecuación (6) de 3, podemos escribir que la $R_{P.A.T.}$ de la T.T. que deseamos medir es:

$$R_d = \frac{\rho}{2 \pi A} \quad (19)$$

en la que A es el radio ficticio de un electrodo hemisférico que tuviera la misma $R_{P.A.T.}$ en suelo homogéneo e isótropo en vez del suelo real en que se halla la TT a medir. ρ ($\Omega \cdot m$) es la resistividad volumétrica que hemos definido en 2.6.

Supongamos que en la Figura 6 se conecta P_1 con C_1 o, lo que es lo mismo, se hace:

$$X'' = A \quad (20)$$

Se obtiene la Figura 7 que es la base de la teoría que nos proponemos desarrollar.

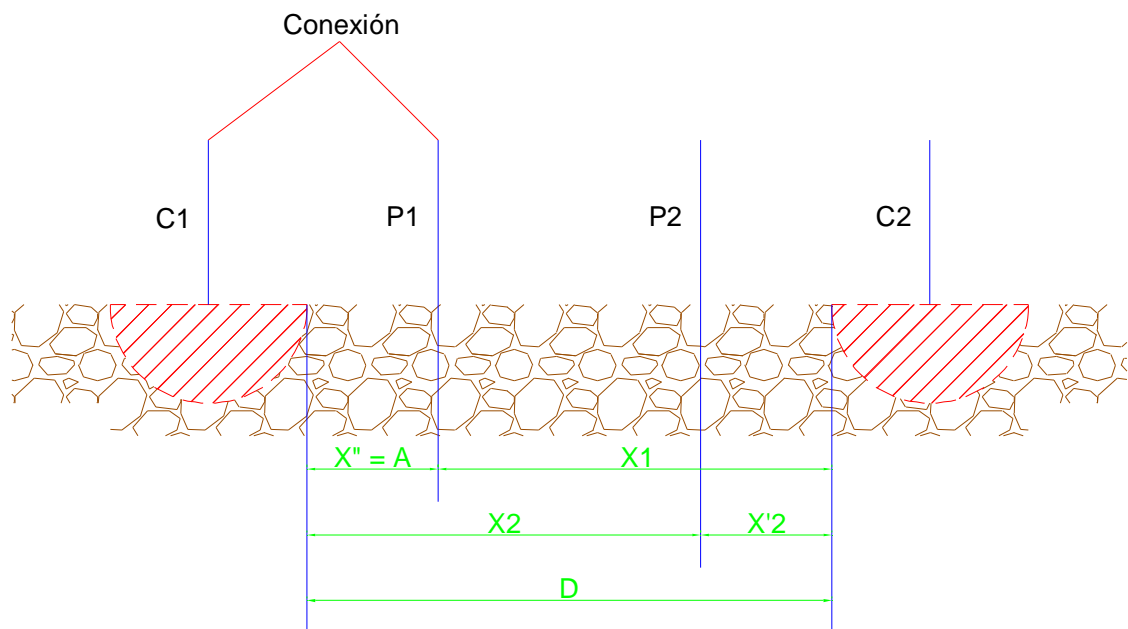


Figura 7: Disposición Básica de la Teoría Unificada

De la Figura 6 se obtiene:

$$X'_1 - D = X_1 - D = A \quad (21)$$

$$X'_2 - D = X_2 \quad (22)$$

Podemos establecer:

$$X_2 = \alpha \cdot D \quad (23)$$

En que α es un parámetro arbitrario a determinar, tal que:

$$\alpha \leq 1 \quad (24)$$

o sea que P_2 puede, a lo sumo, coincidir con C_2 .

Si reemplazamos 20, 21, 22 y 23 en la (18) tendremos:

$$U_{1-2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{D-A} - \frac{1}{\alpha \cdot D} + \frac{1}{D-\alpha \cdot D} \right) \quad (25)$$

Si llamamos ε_c , al conjunto

$$\frac{1}{D-A} - \frac{1}{\alpha \cdot D} + \frac{1}{D-\alpha \cdot D} = \varepsilon_c$$

la (25) se transforma en:

$$U_{1-2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{A} - \varepsilon_c \right) \quad (26)$$

Sí llamamos R_m a la resistencia que se mide, por cualquier método, entre P_1 , y P_2 , que puede expresarse como relación entre U_{1-2} y la corriente que la genera, podemos poner (de la 26)

$$R_m = \frac{U_{1-2}}{I} = \frac{\rho}{2\pi} = \left(\frac{1}{A} - \varepsilon_c \right) \quad (27)$$

Si recordamos (ecuación 19) que el primer término de (27) es, por definición la $R_{P.A.T.}$ que deseamos medir y que hemos designado por R_d tendremos:

$$R_m = R_d - \frac{\rho}{2\pi} \cdot \varepsilon_c$$

o sea:

$$R_m = R_d + \Delta R_m \quad (28)$$

que nos dice que la resistencia R_m es igual a la resistencia real de la P.A.T. (R_d) más un error sistemático (ΔR_m).

4.2.3 Medición de la resistividad de un suelo por el método de Wenner

En 2.6 hemos definido la resistividad aparente o equivalente alrededor de un punto O_r de referencia.

Partiendo de la fórmula (9), Wenner, mediante un simple artificio, propuso un método de medición de la misma que, por su sencillez, se ha adoptado universalmente. Este artificio consiste en adoptar la misma distancia entre sí para los cuatro electrodos de la Figura 6 con lo que ésta queda transformada en la Figura 8.

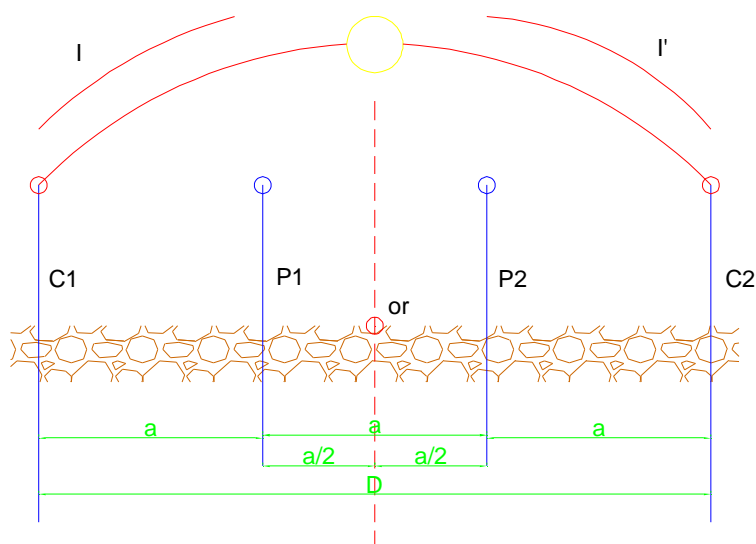


Figura 8: Medición de resistividad por el Método de Wenner

Con este artificio, las distancias de la figura 6 se transforman en:

$$\begin{aligned} X_1 &= a & X'_1 &= D - X_1 = 2a \\ X_2 &= 2a & X'_2 &= D - X_2 = a \\ D &= 3a \end{aligned}$$

y la fórmula (25) adopta la forma:

$$U_{1-2} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{2}{a} - \frac{2}{2a} \right) \quad (29)$$

$$U_{1-2} = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi a} \quad (30)$$

de donde puede despejarse:

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{U_{1-2}}{I} \quad (31)$$

Si recordamos que hemos llamado R_m a la resistencia medida, por cualquier método, como la relación entre la diferencia de potenciales que se mide entre los puntos P_1 y P_2 (U_{1-2}) y la corriente que la genera, podemos poner:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R_m \quad (32)$$

Ecuación básica de la medición de la resistividad del suelo en función de la resistencia R_m sobre la que debemos hacer algunas consideraciones.

En primer lugar, la fórmula (32) se ha deducido bajo el supuesto de que los electrodos C_1 , C_2 , P_1 y P_2 son puntuales. El hecho de estar representados en la práctica por pequeñas jabalinas hincadas a una profundidad h viola este supuesto y hace que la medición sea solo aproximada.

Un valor práctico, aceptado universalmente como suficientemente exacto, se obtiene con: $h \leq \frac{a}{2}$

Introduciendo estas consideraciones la Figura 8 se transforma en la Figura 9.

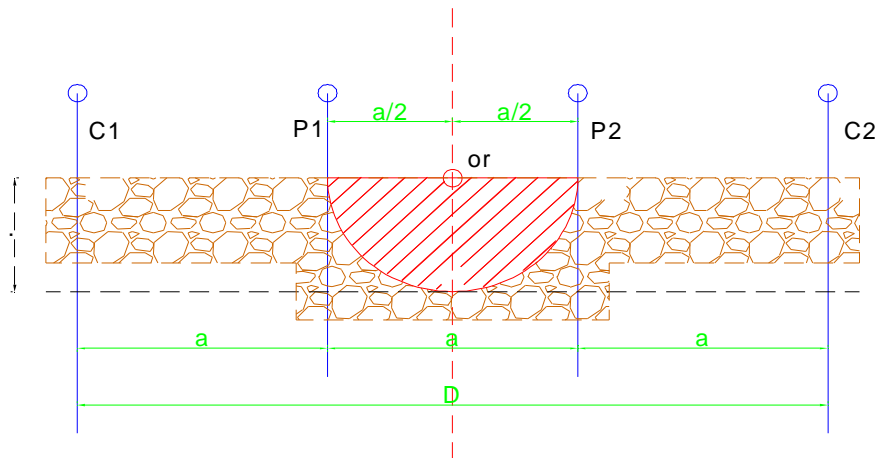


Figura 9: Profundidad de la Medición en el método de Wenner

Dado que toda la teoría que hemos desarrollado se basa en la del electrodo hemisférico, en la disposición de Wenner el punto O_r queda, de hecho, centrado en la línea de los cuatro electrodos.

Dada la forma de las superficies equipotenciales de U_{1-2} , el valor de R_m será el mismo para todos los puntos comprendidos en la semiesfera de suelo de radio $a/2$, según lo destacamos en la Figura 9. Esto permite explorar el valor de ρ a diferentes profundidades variando a y trazar el perfil edafológico a diferentes profundidades.

5. MEDIDORES DE TIERRA

5.1 GENERAL

Con la finalidad de medir de manera práctica los valores de la resistencia de dispersión de una toma de tierra ($R_{P.A.T.}$) y de la resistividad media de los suelos, se ha diseñado un instrumento llamado telurímetro (*de telúrico = referido a la tierra y metro = medir*) o *terrómetro*. Este instrumento incluye los elementos que se utilizan para determinar estos valores en otras metodologías más complicadas y engorrosas que se usan con finalidades específicas.

5.2 CIRCUITO BÁSICO DEL TELURÍMETRO

Existe una variedad de circuitos para diferentes facilidades de medición pero esencialmente todos se reducen al esquema de la Figura 10.

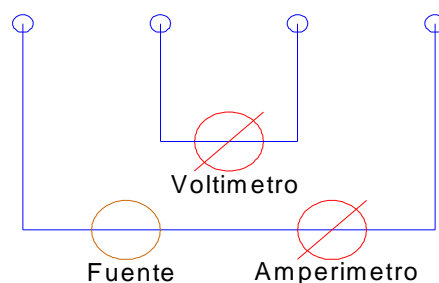


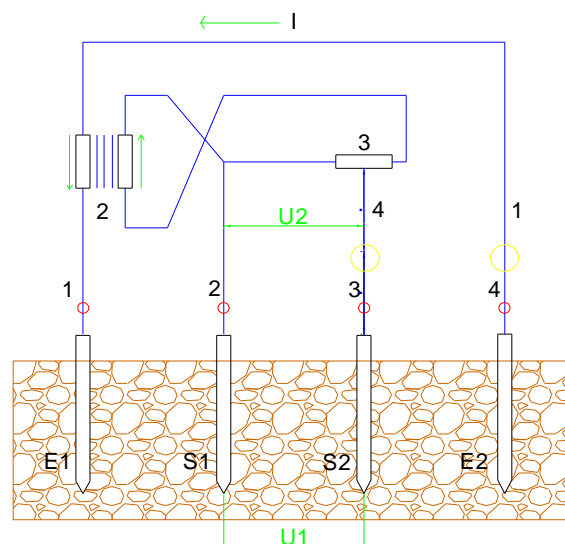
Figura N° 10: Circuito básico de un Telurímetro

La comparación de la Figura 10 con la 6 nos permite ver que los cuatro bornes (1 a 4) corresponden a los electrodos C_1 , P_1 y P_2 y C_2 sobre los que hemos desarrollado la teoría unificada de las ecuaciones (9) y (18).

Entre los bornes 1 y 4 ($C_1 - C_2$) está conectada una fuente de alimentación y un amperímetro que entregan, la primera, la corriente I de nuestra teoría y el segundo la mide. Sobre esta corriente y la fuente que la genera debemos aclarar que necesariamente debe ser alternada para evitar la deformación de valores que los fenómenos contraelectromotrices producen en el caso de la corriente continua (en todo este tema de la toma de tierra debe siempre tenerse presente la **importancia que adquiere el agua en el complejo que forma el suelo**). En rigor de verdad, el agua genera soluciones de sales que son las responsables de estos fenómenos deformantes que queremos evitar en las mediciones. La corriente continua **está universalmente contraindicada para mediciones de tierra. La fuente está regulada de modo de producir una tensión constante, siendo esta una condición básica para las mediciones.**

Entre los bornes 2 y 3 ($P_1 - P_2$) está, para medir $U_{1,2}$ de nuestra teoría, el voltímetro V .

La Figura 11 muestra el circuito básico del medidor de tierra **Siemens** (*Fuente J.C. Arcioni, "Puesta a tierra de Sistemas Eléctricos de BT, MT y AT" curso dictado en la Asociación Electrotécnica Argentina, tomo 11*). La fuente de alimentación es un magneto que mantiene el valor de la tensión U (*En los telurímetros electrónicos esta fuente es un oscilador con salida regulada*) aproximadamente constante. La lectura que da el instrumento es $R = U/I$ obteniéndose el valor de U por ajuste a cero de un puente (4) quedando a cargo de la inteligencia interna del aparato el cálculo de la relación que aparece en la escala como resistencia. Los bornes 1 y 2 deben puentearse para que ambos instrumentos midan a partir de un mismo cero.



- 1: Fuente de corriente alterna
- 2: Transformador
- 3: Potenciómetro
- 4: Instrumento detector de equilibrio
- E₁-E₂: Electrodo de corr; S₁-S₂: Tensión

Figura 11: Circuito del Medidor de Tierra Siemens

5.3 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE UNA P.A.T. CON EL TELURÍMETRO

Retomaremos en este punto la teoría desarrollada en 3. El telurímetro se ha diseñado para medir U_a (ver Figura 4), expresada en la ecuación (5) y el valor 1 de la corriente inyectada que genera esta tensión. Su inteligencia interna está diseñada para presentar como lectura la relación entre estas dos magnitudes o sea:

$$R = \frac{U_a}{I}$$

que hemos definido como resistencia de dispersión (R_d) o resistencia de puesta a tierra ($R_{P.A.T.}$) en 2.

En la Figura 12 mostramos la conexión del telurímetro con los electrodos de medición para que valga la teoría hecha en 4.2.

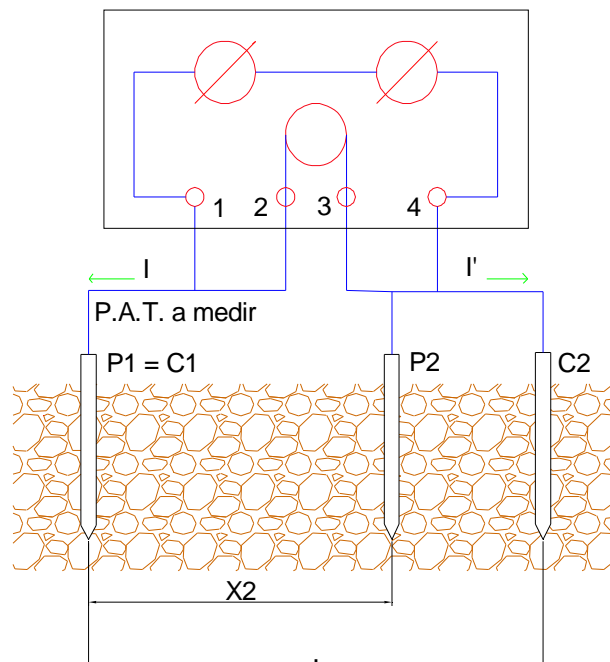


Figura 12: Medición de $R_{P.A.T.}$ por caída de potencial.

5.4 VARIACIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL ÁMBITO DE LA MEDICIÓN

Retomemos la teoría hecha en 3 y especialmente las Figuras 3 y 4.

Aquí nos aparece la necesidad de adoptar, para hacer compatibles los hechos con la teoría desarrollada, la corriente I en sus dos fases: corriente de entrada por C_1 (I) y de salida por C_2 (I'). Si dibujamos para la Figura 12 la curva de la tensión U_x de la Figura 4 tenemos la Figura 13 en que se superponen las curvas U_x , generada por I y U'_x , generada por I' ($I = I'$).

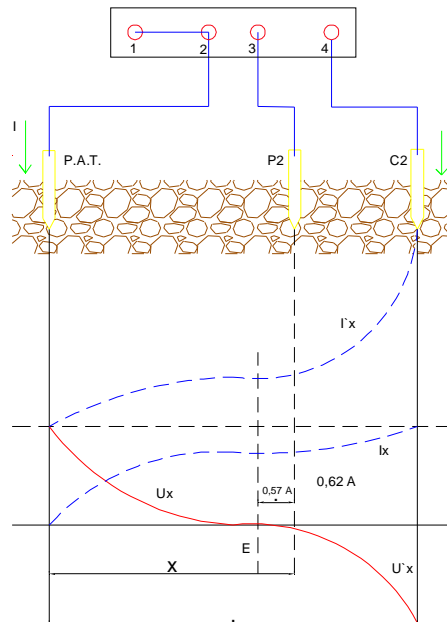


Figura 13: Superposición de $U_x - U'_x$

Vemos que hay una zona en que ambas curvas no se superponen. Se diferencian en la magnitud dada por la diferencia entre la hipérbola y su asíntota (Se demuestra que el menor error se comete en la zona entre 0,53% y 0,62% de D). El hacer coincidir estas dos curvas significa el aceptar un error variable con la posición de C_2 y P_2 con respecto a P.A.T.. En general este será tanto menor cuanto más alejados estén ambos de P.A.T. por ser menor la diferencia entre la hipérbola y su asíntota.

En la Figura 14 mostramos en función de los campos generados por la corriente I en P.A.T. y C_2 el significado de esta zona y el error que se comete para diferentes posiciones de P_2 manteniendo D invariable. Hemos tomado como cero la posición de P_2 a 0,62 D que se acepta es el límite dentro del cual el error es mínimo y negativo (53% y 62% de D). En P_2 hemos destacado el incremento de error (ΔE) que mide el telurímetro cuando C_2 está demasiado cerca de P.A.T..

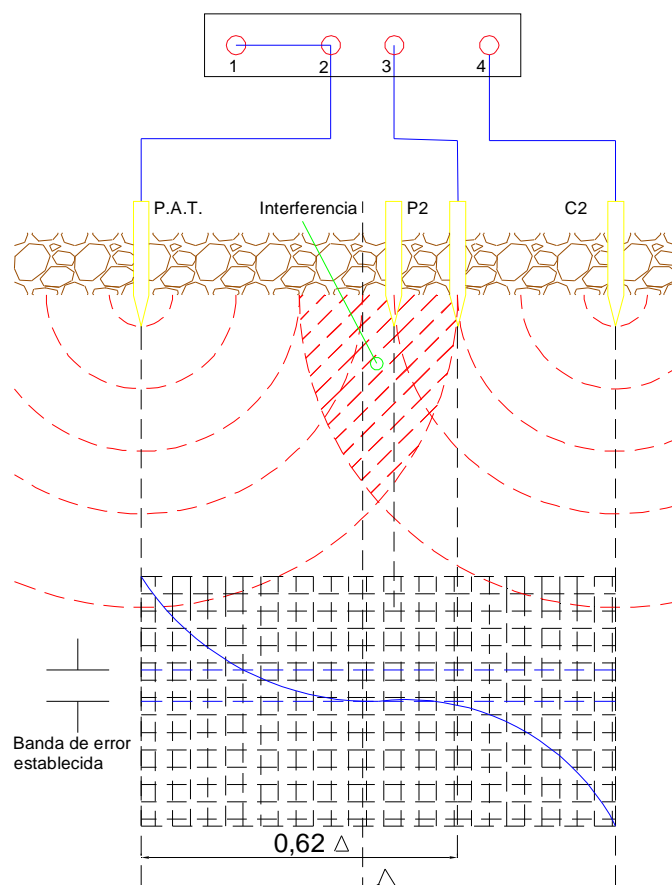


Figura 14: Error para diferentes posiciones de P₂.

En la práctica suele adoptarse como adecuada la distancia $D = 30$ m. Esto fija el valor x_2 de la Figura 12 en $0,62 \times 30 = 18,6$ m, adoptándose como criterio práctico $x_2 = 20$ m.

Aquí cabe una observación: Teniendo en cuenta que la corriente I que genera la caída de tensión entre la P.A.T. a medir y el electrodo de inyección es el resultado de aplicar la tensión fija producida por el telúrimetro, lo que en realidad se está midiendo es la resistencia del suelo más la de los conductores que conducen la corriente. Esto puede no ser importante pero cuando la P.A.T. tiene un valor bajo o los conductores son muy largos el error producido en la medición puede ser importante por lo que es conveniente conocer el valor agregado por estos para ser descontado de la lectura.

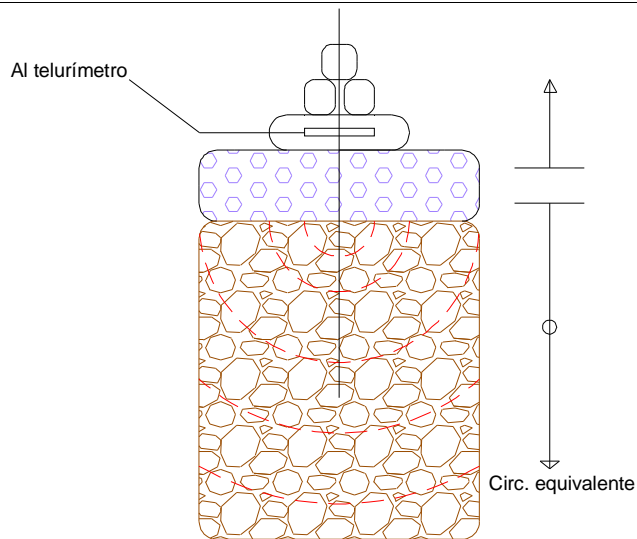
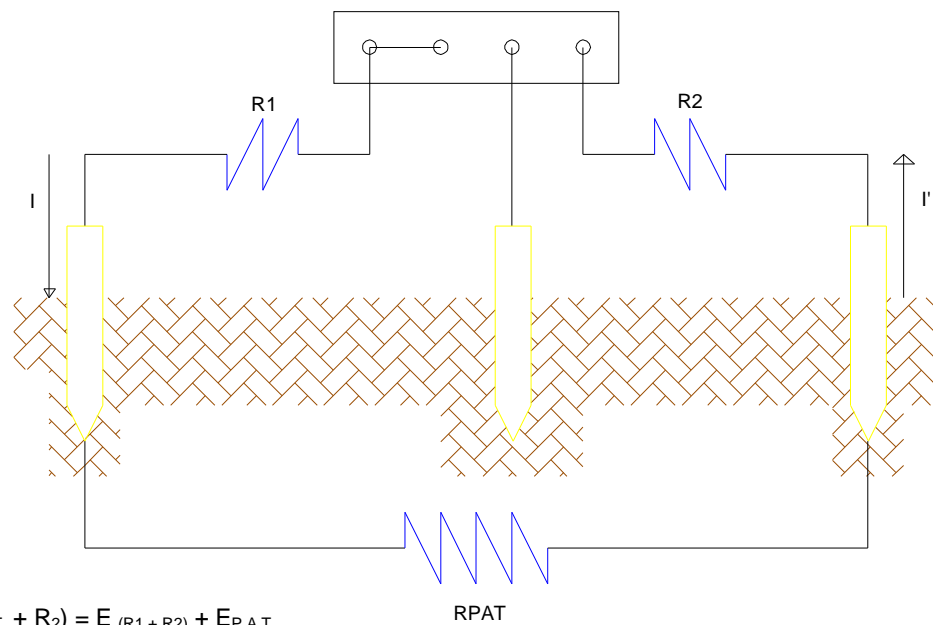


Figura 15: El Electrodo virtual

La Figura 16 muestra la generación de este error.



$$E_m = I (R_1 + R_{P.A.T.} + R_2) = E_{(R_1 + R_2)} + E_{P.A.T.}$$

$$E_{P.A.T.} = E - E_{(R_1 + R_2)}$$

Figura 16: Resistencia de conductores de medición

6. ALGUNOS PROBLEMAS QUE PRESENTA LA MEDICIÓN DESCRIPTA EN 5.3 (SOLUCIÓN PRÁCTICA)

6.1 GENERAL

El método de medición descrito en 5.3 exige que se disponga de suelo despejado para hincar las jabalinas que actúan como electrodo de inyección y sonda de tensión. Ocurre que, en muchísimos casos no se dispone de este suelo y nos hallamos en la situación de que tenemos que sustituir las jabalinas por algún otro electrodo o diseñar otro método de medición. Disponemos del método de los **electrodos virtuales y de la medición por triangulación** para resolver el problema.

Toda la teoría que hemos desarrollado sirve para electrodos puntuales pero cuando se trata de medir la resistencia de tierra de una malla de puesta a tierra se producen errores apreciables de los valores medidos. Veremos que disponemos de metodología para superar este problema aceptando un error en la medición despreciable para el instrumento usado y los fines prácticos.

6.2 EL MÉTODO DE LOS ELECTRODOS VIRTUALES

El método consiste en utilizar como jabalina un electrodo consistente en una chapa de cobre de por lo menos 0,40 x 0,40 m (el espesor no interesa en teoría pero, por razones prácticas, 0,5 mm es una dimensión adecuada, se trata de que la chapa tenga suficiente rigidez). A esta chapa se suelda un conductor para que permita conectar la mordaza del conductor al instrumento utilizado. La chapa se envuelve con un tejido esponjoso (una frazada vieja puede servir o, si se prefiere, una funda de poliuretano expandido) con el que se forma un bolsillo del tamaño de la chapa para que se adhiera a la misma.

Para utilizar este electrodo se moja abundantemente el tejido de cubierta con salmuera o simplemente con agua y se lo coloca sobre el pavimento sólido. Para lograr una mayor adherencia se deben colocar algunas piedras, unos 40 kilos en total, o bien se hace parar una persona.

Esta chapa, actuando por capacidad (Una placa del capacitor es la chapa y la otra la porción imagen del suelo con el dieléctrico pavimento aislante) se lo utiliza como cualquier jabalina de medición.

La Figura 15 muestra el funcionamiento de este electrodo. El circuito equivalente de la derecha muestra que si hubiera que trabajar con corriente continua el sistema es inaplicable por la interposición del capacitor.

6.3 LA MEDICIÓN POR TRIANGULACIÓN

6.3.1 El telurímetro como medidor de resistencias

El telurímetro, puentado adecuadamente, es un excelente medidor de resistencias. Volviendo a la Figura 10 recordemos que entre los bornes 1 y 4 ($C_1 - C_2$) tenemos conectado el amperímetro y la fuente de emisión y entre los bornes 2 y 3 ($P_1 - P_2$) el voltímetro. Si se puentean los bornes 1 y 2 y los 3 y 4 y entre estos dos puentes se conecta una resistencia, la medición del instrumento será el valor de esta resistencia. La Figura 17a muestra estas conexiones.

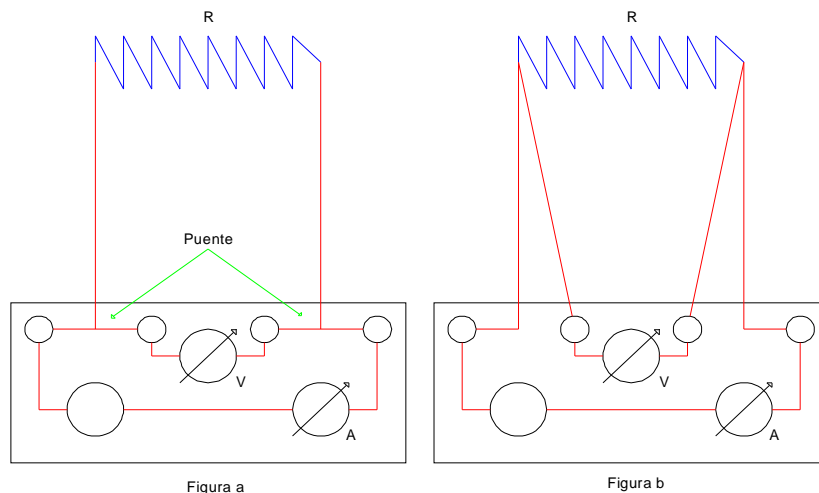


Figura 17: Medición de resistencias con telurímetro

En realidad lo que mide el telurímetro es la resistencia a determinar más la de los conductores que la unen a los puentes. Si la longitud de los conductores es apreciable, introducen un error que conviene evitar.

Para ello no se hacen los puentes entre los bornes sino que se conectan los bornes 1 y 2 con dos conductores diferentes, aislados, con la entrada de la resistencia a medir y los 3 y 4 cada uno con un conductor aislado con la salida (lo adecuado es utilizar conductores **aislados bipolares**). Puede apreciarse que el puente se ha trasladado desde el instrumento a la resistencia eliminando la influencia de los conductores. La Figura 17b muestra estas conexiones.

6.3.2 El método de triangulación

El fundamento del método se basa en que, siendo el SEN único, si se tiene dos tomas de tierra independientes sus resistencias de tierra (el suelo presenta resistencia y no impedancia al paso de la corriente alterna hasta los 30 KHz.) son cortocircuitadas por el mismo. De tal manera, si puentamos el telurímetro para medir resistencias, como hemos explicado en 6.3.1 y ponemos el conductor de una toma de tierra como entrada (bornes 1 - 2) y el de la otra como salida (bornes 3 - 4) lo que mide el telurímetro es la suma de las dos resistencia de tierra. La Figura 18 muestra el fundamento explicado.

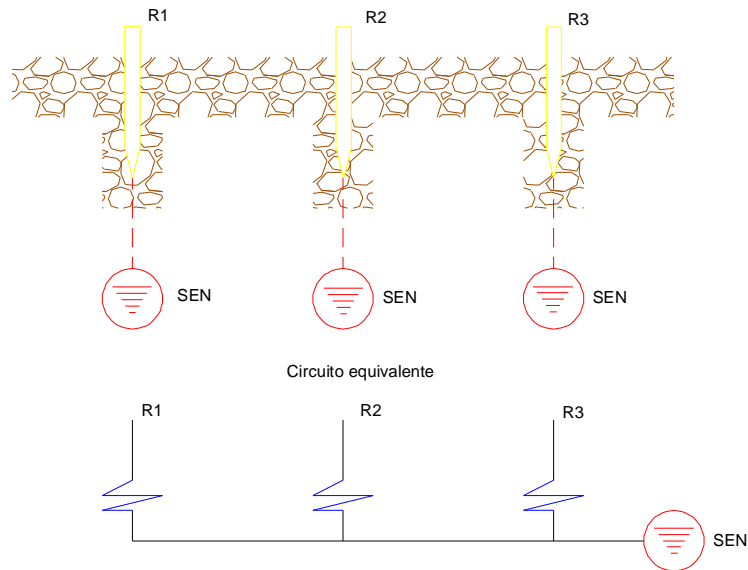


Figura 18: Fundamentos de medición por triangulación

Si tenemos dos resistencias auxiliares independientes entre sí y de la a medir, se pueden medir de a pares y se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, fácilmente resoluble. Este sistema se plantea:

$$\begin{aligned}
 M_1 &= R_1 + R_2 = X \\
 M_2 &= R_2 + R_3 = Y \\
 M_3 &= R_1 + R_3 = Z
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

R₁, R₂ y R₃ son las incógnitas y X, Y y Z las mediciones hechas.

Es indispensable que las tres resistencias sean independientes porque de no serlo se deforman los valores medidos creando indefiniciones en los resultados. Por ello debe verificarse, antes de la medición esta independencia lo que se hace muy fácilmente por medio de una chicharra sensible o un buscapolos común. Las tomas de tierra adoptadas como auxiliares pueden ser naturales o bien una o ambas o electrodos virtuales siempre que cumplan la condición de independencia.

La siguiente es una planilla que utilizamos en nuestro trabajo, que resulta sencilla y muy útil para el cálculo de los resultados en campana.

PLANILLA DE MEDICIÓN POR TRIANGULACIÓN

Fecha:/...../.....

Lugar de medición:

Operador:

Temperatura ambiente:

Estado del suelo:
.....

R₁:

R₂:

R₃:

Verificación de independencía

R₁ - R₂ = R₁ - R₃ = R₂ - R₃ =

Medición

R₁ + R₂ = X = R₁ + R₃ = Y = R₂ + R₃ = Z =

Cálculo

$$R_1 = \frac{X - Z + Y}{2} = \dots\dots\dots$$

$$R_2 = \frac{X + Z - Y}{2} = \dots\dots\dots$$

$$R_3 = \frac{Y - X + Z}{2} = \dots\dots\dots$$

6.4 EL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN DE UNA MALLA EXTENDIDA

6.4.1 General

Hemos desarrollado toda nuestra teoría de la **medición sobre la base de un electrodo puntual y nuestras conclusiones** no tienen objeción lógica. Cuando el electrodo a medir deja de ser puntual para transformarse en una malla de tierra extendida en el suelo se producen errores que consideraremos en lo que sigue.

En la Figura 19 mostramos los dos casos dibujando la marcha de los filetes de corriente al circular en el suelo. Puede notarse que hay filetes que se apartan de la línea recta entre el electrodo a medir y el de inyección. Ello se debe a que, no siendo muy grande la resistencia del suelo, parte de la corriente se deriva hacia afuera, tanto más cuanto menos resistivo es el suelo.

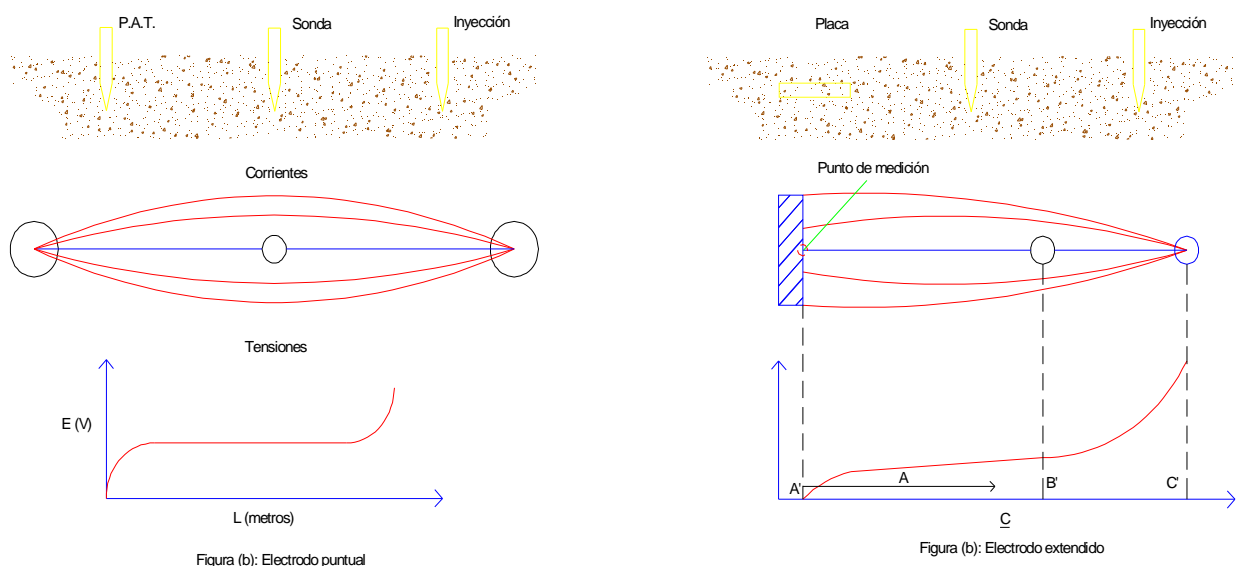


Figura 19: Filetes de corriente en medición de T.T.

En la misma figura se ve que en el caso de la malla de tierra, estando la misma a igual potencial los filetes se abren pasando el centro eléctrico de los mismos un poco más corrido hacia afuera. Esto introduce un error en la medición que puede ser apreciable a poco que la malla aumente su extensión.

Esto es debido a que la estructura del telurímetro, como hemos visto, está preparada para dar R como el cociente entre la tensión medida por el voltímetro y la corriente medida por el amperímetro y resulta que la primera, en este caso, no corresponde a la que genera la segunda, ya que los filetes externos no participan en su generación. La corriente medida es mayor que la que corresponde a la tensión con lo que la resistencia medida resultará menor que la real. Ello resulta también evidente de la observación de las Figuras 13 y 14. En esta última hemos destacado la zona en que la influencia negativa de U_x se resta de U'_x . En realidad este error siempre existe pero hay un cierto punto en que resulta despreciable.

Se pueden tomar algunas medidas para disminuir el error que trataremos de considerar.

6.4.2 Alejamiento del electrodo de inyección

A medida que alejamos el electrodo de inyección la dispersión de los filetes de corriente disminuye con lo que el centro eléctrico se acerca al de la placa disminuyendo el error o, dicho de otro modo, el electrodo de inyección y la sonda, al alejarse, quedan en zonas menos influenciada por la dispersión producida por la extensión de la placa.

El problema que presenta esta solución es que el alejamiento del electrodo de inyección es apreciable para que la disminución del error sea sensible, llegando a veces a ser de kilómetros lo que produce dificultades en su implementación.

6.4.3 Método de las aproximaciones sucesivas

Para obviar el inconveniente de las grandes distancias a que hay que colocar el electrodo de inyección a poco que se extienda el tamaño de la malla se ha diseñado un método aproximado que pasamos a describir.

En la curva de tensiones de la figura 19 vemos que la lectura de la sonda de tensión cae dentro de una zona deformada por el hecho de ser la distancia C insuficiente para aplanar esta curva.

Por lo tanto, si determinamos varias lecturas de resistencia (con error), a diferentes distancias del borne de la malla para una distancia C adoptada tendremos varios valores distintos. Si tomamos valores diferentes de C y repetimos la operación obtendremos nuevos juegos de valores todos diferentes.

Volviendo a la Figura 19, en la parte dedicada a los electrodos extendidos, podemos poner, suponiendo que hemos colocado el la sonda tensión B' en el punto de mínimo error, llamando x a la distancia entre el borde de la malla y el centro eléctrico resultante de la posición de C' , $0,618 C$ (más arriba hemos tomado $0,62$ para abreviar)

$$P = 0,618 (C + X) - X \quad (34)$$

o sea

$$X = \frac{0,618 C - P}{0,382} \quad (35)$$

la (35) permitiría calcular el valor de la distancia a que se halla el centro eléctrico de la malla del punto A' que hemos adoptado para medir. Nosotros usaremos esta ecuación para construir una curva que nos servirá para la determinación del valor correcto de la resistencia de la malla. Como conocemos los valores de C y P podemos, haciendo un cambio de variables, tomar $R = f(x)$ y representar cada conjunto de valores en una curva que resulta similar a la de la Figura 20. Esta curva representa, ni más ni menos, que los errores cometidos con respecto al valor correcto al tomar el borde de la malla como punto de medición. Si analizamos esta curva veremos que, al variar la posición de P hemos ido variando x y, en algún momento, hemos pasado por el centro eléctrico correcto.

Si superponemos estas curvas obtenemos la Figura 22, extraída de un caso real.

El triángulo rayado representa los valores de resistencia con error para las distancias $C = 120$ y 150 metros, limitados, el la zona doble rayada por las mediciones con error para $C = 180$ y 200 metros. El baricentro de ésta última zona contiene el valor correcto de R .

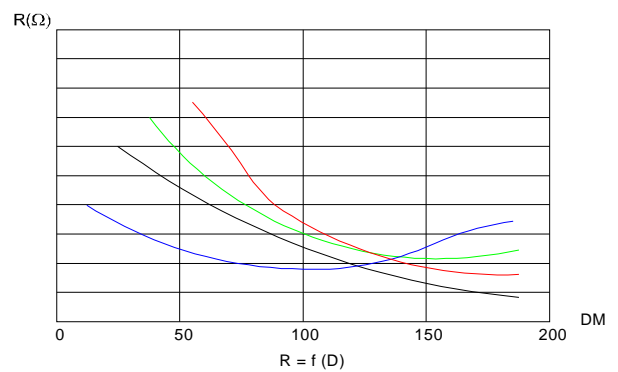
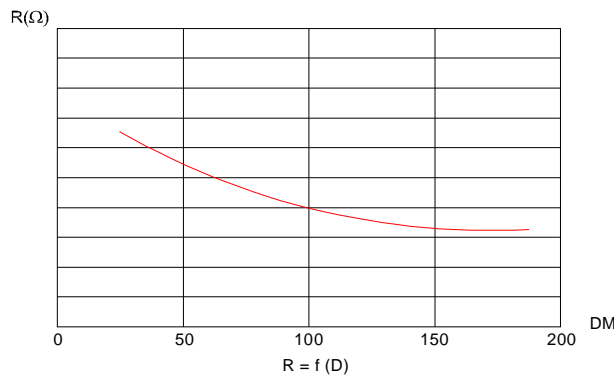


Figura 20: Curva de valores obtenidos. C' muy cercano

Figura 21: Conjunto de curvas obtenidas con dif. C' .

Hay que tener en cuenta ciertas limitaciones en la aplicación de este método. En primer lugar, el valor de C no puede ser inferior a ciertos límites. La experiencia indica que, tratándose de una malla cuadrada de lado L , no debe ser inferior a este valor.

Tampoco debe ser mayor que ciertos límites pues, además de conspirar contra el objetivo del método, las curvas se aplanan mucho dificultando la determinación del triángulo. Un valor conveniente puede ser C menor o igual a $2L$.

Para el caso de mallas de formas diferentes al cuadrado deberá emplearse sentido común dentro de los límites anteriores y, si la forma de la toma de tierra es irregular, se la considerará inscrita en un cuadrado

El inconveniente que tiene este método es que, si bien resuelve el problema de la viabilidad de la medición, es muy laborioso.

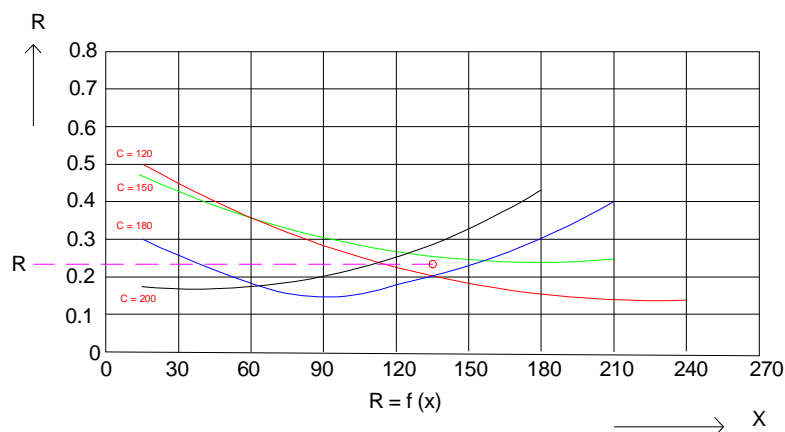


Figura 22: Determinación del valor de R

6.4.4 Otro enfoque de la medición

En otro lugar hemos analizado el comportamiento de las corrientes y el suelo bajo el supuesto de desprestigiar el error que se produce al tomar la curva por su asíntota (Véase *Varela M. D. "Consideraciones sobre medición de tomas de tierra"*). En ese trabajo mostramos que, desprestigiar un error en las mediciones de $0,01 \Omega$ que a veces cae fuera de la precisión del instrumento y, en todo caso, carece de importancia en las aplicaciones prácticas, las corrientes que utilizamos en toda esta teorización, se limitan a un terrón de suelo que depende de la resistividad del mismo centrado con la jabalina de medición. Esto ocurre porque, en el límite de este terrón, la corriente específica inyectada o extraída por el telurómetro llega a valores tan bajos que no llegan a producir el error desprestigiar que hemos adoptado.

En esta concepción, que hemos llamado estática, para diferenciarla de la dinámica anterior, el terrón de tierra queda adherido a la jabalina de medición y carece de sentido el poner alineados los electrodos de medición con que deseamos medir. Tampoco la posición relativa. El telurómetro no se entera de este detalle: recibe la corriente de entrada y entrega la corriente de salida como si nada hubiera cambiado.

Siguiendo la concepción dinámica sobre la que hemos basado toda la teoría hecha hasta ahora, estas últimas consideraciones producen un impacto que requiere una explicación. La aceptación de este nuevo error residual (ya hemos aceptado varios), desprestigiar desde un valor de corriente específica en adelante nos hace tomar la corriente y tensión en los límites del terrón de tierra como inexistente más allá del mismo y como tensión del SEN la segunda. Este valor es el mismo para toda la corteza terrestre ya que, sin corrientes que produzcan diferencias de tensión, toda la corteza está en equilibrio (Si no lo estuviera se producirían corrientes de equipotenciación hasta lograr este equilibrio). de modo que la tensión que toma la sonda es la del SEN y la corriente que mide el telurómetro es la del SEN, de entrada y salida.

Esta concepción vale también para la zona de influencia de la malla de tierra de modo que, si trabajamos fuera del terrón que la rodea, sujeto a su influencia, no se cometerá el error que tratamos de evitar. En el mismo trabajo citamos al comienzo, exploramos las zonas de influencia para diferentes resistividades de terreno y llegamos a la conclusión de que utilizando electrodos de inyección distantes 50 metros de la malla, con la sonda de tensión a los usuales 30 metros, se está con un determinado margen de seguridad fuera de la zona de influencia de la malla y se puede medir su resistencia de tierra sin el error que nos preocupa.

PROGRAMA DE TRABAJOS PRÁCTICOS

Se adoptará una toma de tierra cuyo valor se medirá con la mayor exactitud posible. Será conveniente pero no indispensable el tener en las cercanías un pavimento de hormigón para probar la eficacia de los electrodos virtuales. Se harán las siguientes mediciones:

1. *La medición por el método clásico ya se practicó al determinar el valor de la resistencia testigo.*
2. *Repetir la medición utilizando como electrodo de inyección un electrodo virtual.*
3. *Repetir la medición agregando a lo anterior otro electrodo virtual para la sonda de tensión.*
4. *Medir la resistencia de la TT P.A.T.rón por el método de triangulación. Verificada ya la eficiencia de los electrodos virtuales pueden utilizarse como tierras auxiliares pero primeramente deben buscarse estos por el método de chicharreo.*
5. *Medir la resistencia de la TT P.A.T.rón variando la posición de las jabalinas auxiliares para comprobar la teoría estática.*
6. *Medir la resistividad del suelo en que se está trabajando por medio del método de Wenner. Hacer el perfil edafológico hasta una profundidad de 6 metros.*