

# Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica

Félix Humberto Montaña Mejía, Pedro Alfonso Vega Vega / EEB S.A. E.S.P.

COLOMBIA

fmontano@eeb.com.co

hmontano@tutopia.com

III Congreso CIER de la Energía - CONCIER 2007  
27 al 30 de noviembre de 2007  
Medellín, Colombia

## INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. CONSIDERACIONES PARA ESTUDIOS GEOFÍSICOS
3. RESISTIVIDAD EN LOS MATERIALES GEOLÓGICOS
4. PRINCIPIOS DE LOS MÉTODOS GEOELÉCTRICOS CONVENCIONALES
6. MÉTODO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA (TER)
7. DESARROLLO INSTRUMENTAL
8. APLICACIONES
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
10. REFERENCIAS

**Resumen:** En este artículo se hace un recuento de los métodos tradicionales para la medición de resistividad del subsuelo, nos referimos a los métodos llamados sondeos eléctricos verticales (SEV's) y como tema central de este artículo presentamos una metodología reciente para la medición de la resistividad del suelo mediante la técnica llamada Tomografía Eléctrica Resistiva (TER).

Adicionalmente presentamos el desarrollo de sistemas para la adquisición de información, uno de los algoritmos de interpretación y algunas aplicaciones en el diseño de puestas a tierra, validación de estudios de inestabilidad geotécnica y protección catódica de estructuras enterradas que el grupo de trabajo ha realizado.

***in apparent resistivity. In homogeneous soil conditions, which rarely occur in practice, the uniform soil model may be reasonably accurate. If there is a large variation in measured apparent resistivity, the uniform soil model is unlikely to yield accurate results.*** y ANSI/IEEE Std. 81: 1983, "Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface" [11] recomienda el método Wenner usado para la medición de la resistividad del suelo y su interpretación como un modelo de capas, en el numeral **7.3.4 Four-Point Method** ***"However, a better solution assumes an earth model such as: a) Uniform resistivity b) Horizontal layers of uniform resistivities c) Exponential variation of the resistivity"***.

## 1. Introducción

Este trabajo fue motivado en la revisión de la teoría del problema directo de acuerdo con Koefoed [3], el cual plantea para la interpretación de los datos de resistividad aparente, un modelo de capas, basado en un suelo homogéneo, isotrópico, con capas paralelas a la superficie, etc. y las recomendaciones contenidas en las normas ANSI/IEEE Standard 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" [10], en el numeral 13.4 Interpretation of soil resistivity measurements se establece que: ***"A uniform soil model should be used only when there is a moderate variation***

Las normas IEEE hacen claridad que un modelo de suelo uniforme debería ser usado sólo cuando hay una variación moderada en la resistividad aparente, y por ende se interpreta que su

aplicación es especialmente restringida a suelos estratificados, homogéneos, isotrópicos, etc. Sin embargo, en la práctica, la aplicación de esta metodología se usa y se recomienda indistintamente. Para el caso colombiano el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE [12] recomienda basado en las normas IEEE 80 y 81 el uso del método Wenner en el numeral 5.1. Medición de resistividad aparente, ***“Las técnicas para medir la resistividad aparente del terreno, son esencialmente las mismas que para aplicaciones eléctricas. Para su medición se puede aplicar el método tetraelectródico de Wenner, que es el más utilizado para determinarla”.***

En nuestro país es usual que los sitios en donde se construye la infraestructura de transporte de energía eléctrica, líneas y subestaciones, normalmente se ubique en zonas de cordilleras, correspondiendo a suelos con geologías complejas en donde la aplicación de la metodología Wenner propuesta en las normas IEEE80/81 y el RETIE no siempre permite una buena interpretación y un adecuado modelo de las estratigrafías del subsuelo.

## 2. Consideraciones para estudios geofísicos

La interpretación inadecuada de los modelos del subsuelo conllevan a diseños erróneos de puestas a tierra, que pueden generar daño de equipo en subestaciones o salidas forzadas por descargas atmosféricas en líneas de transmisión y sobrecostos en la etapa de montaje y en la vida útil de la infraestructura eléctrica.

El modelo de capas se puede considerar adecuado en los siguientes casos:

- a) Cuando la geología corresponde a suelos sedimentarios con capas aproximadamente paralelas a la superficie. Se distinguen estos aspectos en la visualización de afloramientos próximos al sitio de estudio.
- b) Cuando se trata de un depósito de gran espesor de arcilla, arenisca etc.
- c) Cuando al realizar dos SEV's con centro en un mismo punto, pero con tendidos ortogonales, los valores de resistividad aparente calculados para cada arreglo no presentan diferencias apreciables. Se aclara que cuando se realiza un SEV la información obtenida es representativa del centro del arreglo, por consiguiente si el suelo es homogéneo isotrópico, los valores de resistividad aparente para los dos SEV's deben ser similares.

En una campaña geoelectrica en todas las etapas del trabajo deben tomarse las precauciones necesarias para obtener la máxima calidad en los resultados finales. Planteamiento del problema, ubicación geográfica, recopilación de datos geológicos regionales y locales. En el sitio en donde se requiere realizar el estudio, se debe hacer una exploración visual identificando posibles afloramientos, materiales del subsuelo, planos de buzamiento, accidentes topográficos y toda información que ayude a mejorar la interpretación de los resultados finales del estudio. Luego, elección del método y modalidad prospectiva en función del objetivo y sus circunstancias. Programación detallada del trabajo de campo, ejecución del trabajo de campo, recopilación y elaboración de los datos obtenidos e interpretación física de los resultados y modelo geológico

Cada una de estas etapas se apoya en la anterior y por consiguiente es necesario que todas las etapas del trabajo se efectúen adecuadamente.

Sin embargo en la práctica generalmente estos aspectos no son siempre considerados.

Presentamos un ejemplo que ilustra la importancia de realizar una exploración visual, el conocimiento de la geología local, etc. En la figura 1 vemos que la estructura de la roca y los planos de buzamiento son casi verticales, por supuesto, en superficie no siempre es reconocible esta morfología y el modelamiento de capas resulta inapropiado.



FIGURA 1. Subsuelo en el cual un modelo de capas no es apropiado.

Teniendo en cuenta las implicaciones de lo expuesto anteriormente, en el desarrollo de este artículo, hacemos una breve presentación del marco teórico de referencia con el fin de llevar al lector a comprender los supuestos y limitaciones de la metodología conocida de manera general como SEVs, en la cual se incluye el método Wenner, ampliamente utilizado en el sector eléctrico, como parte central de este trabajo queremos presentar uno de los métodos de mayor aceptación en los últimos años que puede ser usado para mostrar la distribución de resistividades en suelos, que incluso es de aplicación en geologías complejas. Se describe la metodología TER y sus ventajas frente a los SEVs, posteriormente presentamos algunos ejemplos de aplicación realizados en la infraestructura de transmisión de la Empresa de Energía de Bogotá.

### 3. Resistividad en los materiales geológicos

Una de las propiedades fundamentales de las rocas es la resistividad eléctrica, que sirve para caracterizar el suelo en términos de tipo de material, litología, alteración, saturación, fracturamiento, etc.

Una de las propiedades de las rocas que varía en un amplio rango es la resistividad eléctrica como se aprecia en la figura 2, la principal contribución a este amplio rango de variación es el mecanismo de conducción en las rocas que es principalmente iónica y no electrónica como ocurre en los conductores metálicos.



Figura 2. Resistividad de los materiales geológicos.

Una estructura geológica está compuesta por un agregado de minerales con sólidos líquidos y gases. La resistividad en la roca es dependiente de los materiales que la conforman, de los líquidos y gases que se encuentran en su estructura poral, del tamaño y distribución de los poros, de las sales disueltas, temperatura, etc.

## 4. Principios de los métodos geoelectricos convencionales

Son métodos geofísicos de prospección para el estudio de estructuras geológicas en la parte superficial del suelo. En las rocas, estos métodos se fundamentan en el comportamiento de los campos eléctricos y electromagnéticos en función de su distribución espacial de los materiales, composiciones mineralógicas, sales disueltas, cantidad de humedad, porosidad y otros. Estos métodos permiten obtener características como: resistividad, permeabilidad magnética y constante dieléctrica. Se clasifican como:

- a) potencial espontáneo (SP) que estudia los potenciales naturales en el suelo, no requiere de fuentes artificiales para el estímulo del suelo,
- b) los electro-resistivos que evalúan las propiedades resistivas del suelo,
- c) los de polarización inducida que estudian las variaciones de voltaje en función del tiempo,
- d) el georadar que estudia la constante dieléctrica y permitividad y e) los electromagnéticos que evalúan la conductividad.

### 4.1. Prospección geoelectrica, método de resistividad

Corresponde a una de las clasificaciones de los métodos geoelectricos, que consiste en arreglos de cuatro electrodos alineados y dispuestos simétricamente con respecto a un centro. Estos métodos se basan en el estímulo del suelo mediante la inyección de una corriente a través de dos electrodos (A,B) y como respuesta la obtención de un potencial en dos electrodos (M,N). Ambos grupos de electrodos son hincados en la superficie del suelo. Estos métodos son comúnmente llamados sondeos eléctricos verticales SEVs. En la figura 3 se muestra la configuración típica de uno de los métodos mas utilizados con arreglo central Wenner, las líneas concéntricas a los electrodos A y B corresponden a las líneas de potencial, mientras que las líneas que unen los electrodos A y B son líneas de corriente.

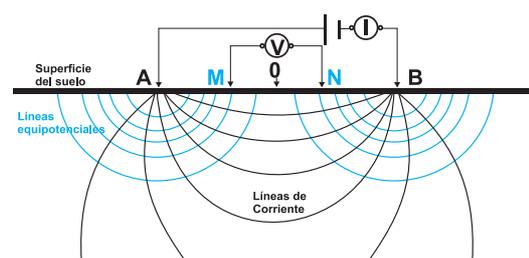


Figura 3. Configuración de electrodos para un SEV.

### 4.2. Función resistividad aparente

Cuando se tiene un medio Semi-infinito homogéneo e isotrópico, el potencial medido a una distancia  $r$  de la fuente de corriente  $I$ , está dado por:

$$V(r) = \frac{\rho}{2\pi r} I \quad (1)$$

En esta ecuación,  $\rho$  es la resistividad verdadera del medio y como los otros términos de la ecuación ( $V$  e  $I$ ) son resultados de una medición, la resistividad también se conoce como resistividad medida o aparente. Esta resistividad aparente va a seguirse observando o midiendo aun cuando el medio sea heterogéneo.

En la figura 4, se identifica cada uno de los electrodos y distancias para un arreglo central tipo Wenner o Schlumberger con las cuales se formula la ecuación general de resistividad aparente. **Esta resistividad aparente va a seguirse observando o midiendo aun cuando el medio sea heterogéneo.**

En la figura 4, se identifica cada uno de los electrodos y distancias para un arreglo central tipo Wenner o Schlumberger con las cuales se formula la ecuación general de resistividad aparente.

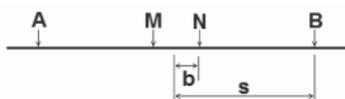


Figura 4. Configuración típica para una medida de resistividad

Se puede evaluar el valor de la resistividad aparente mediante la siguiente ecuación.

$$\rho_a = \frac{2\pi s(s^2 - b^2) \Delta V}{4bs I} \quad (2)$$

El término  $\frac{2\pi s(s^2 - b^2)}{4bs}$  se denomina factor geométrico  $K$  y depende del tipo de configuración de electrodos que se utilice. En general se puede expresar la resistividad aparente como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

### 4.3. Tipos de arreglos

De acuerdo con la disposición y separación de electrodos reciben los siguientes nombres:

#### 4.3.1. Arreglo Schlumberger

$$\rho_a = \pi \frac{b^2 V}{a I} \quad (4)$$

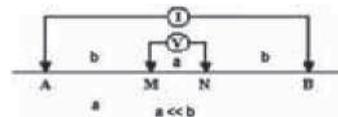


Figura 5. Arreglo Schlumberger

#### 4.3.2. Arreglo Wenner

$$\rho_A = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (5)$$

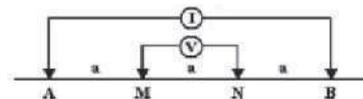


Figura 6. Arreglo Wenner

#### 4.3.3. Arreglo Dipolo-Dipolo

$$\rho_a = \pi na(n+1)(n+2) \frac{V}{I} \quad (6)$$

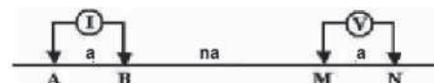


Figura 7. Arreglo Dipolo-Dipolo

#### 4.3.4. Arreglo Polo-Dipolo

$$\rho_A = 2\pi \frac{(a+b)V}{b I} \quad (7)$$

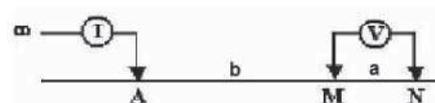


Figura 8. Arreglo Polo-Dipolo

#### 4.3.5. Arreglo Polo-Polo

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (8)$$



Figura 9. Arreglo Polo-Polo

### 4.4. Teoría básica de prospección geoelectrica

La configuración mas usada en prospección para uso en ingeniería eléctrica, es el método Wenner, con separaciones iguales (a) el cual es recomendado en las normas internacionales.

En prospección geofísica uno de los métodos de mayor aceptación es el de Schlumberger en el cual la distancia MN es siempre << que AB y por lo tanto simplifica el proceso de adquisición de la información en terreno, dado que, en general se requiere mover en el proceso de toma de información solo un par de electrodos.

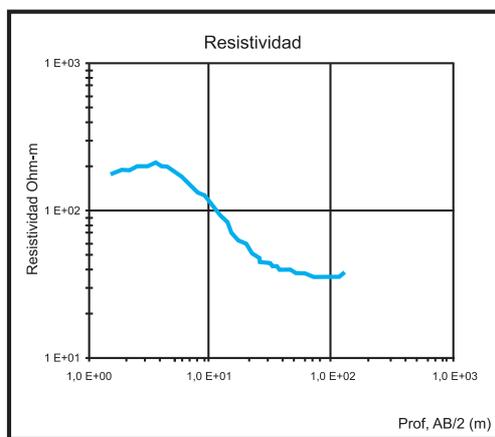


Figura 10. Representación de un SEV.

Los valores de resistividad aparente obtenidos en un SEV, se representan en función de las distancias AB/2 en un gráfico bilogarítmico como el mostrado en la figura 10.

El modelo de terreno generalmente designado 1-D es bastante utilizado para la interpretación de datos de sondeos realizados en zonas de ambientes sedimentarios. Hasta los años 80, el proceso de interpretación de la información adquirida en terreno se hacía mediante la utilización de ábacos, curvas que se superponían a las adquiridas en terreno y que permitían presentar un modelo del suelo.

En los años 80 Koefoed [ 3 ] presentó la teoría del problema inverso a partir del que problema directo, que permite determinar el comportamiento del potencial eléctrico en un medio que se asume constituido por capas limitadas por superficies planas y paralelas a la superficie. Este método considera una fuente de corriente puntual en la superficie de un medio estratificado con capas homogéneas e isotrópicas, con espesores de capa h

y resistividades  $\rho$  como se muestra en las figuras 11 y 12.

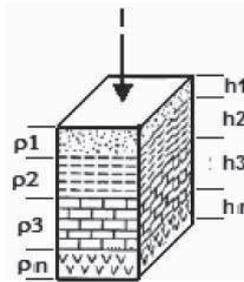


Figura 11. Modelo estratificado.



Figura 12. Suelo estratificado.

Se plantea una expresión para el potencial en términos de corrientes, distancias entre electrodos y parámetros del subsuelo, para esto se soluciona la ecuación de Laplace, para el potencial eléctrico V. La solución se plantea por simetría, en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = 0 \quad (9)$$

Como se asume isotropía en cada capa, no habrá dependencia angular, por lo tanto, sólo subsisten los primeros tres términos y la solución de la ecuación se puede hacer por separación de variables:

$$V(r, z) = U(r)W(z) \quad (10)$$

Esto conduce a las siguientes soluciones para U y W:

$$W = C e^{\pm \lambda z}, \quad U = C J_0(\lambda r) \quad (11)$$

Donde C y  $\lambda$  son constantes arbitrarias y  $J_0$  es la función Bessel de orden cero. De modo que la solución general, suponiendo que C varía en dependencia de  $\lambda$ , será:

$$V = \int_0^\infty [\phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (12)$$

Que con algunas consideraciones y supuestos adicionales se puede escribir como: [1], [3], [4], [6]

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [1 + 2\theta_1(\lambda)] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (13)$$

### 4.5. Resultado modelo de capas

Como resultado del procesamiento e interpretación de la información de campo, se obtiene un modelo de capas aún si la geología al que se aplica el método es heterogénea. Para el ejemplo representado en la figura 13, se interpreta un modelo de cuatro capas; sobre el eje X se representa la profundidad de investigación y sobre el eje Y el valor de la resistividad del suelo. La curva representa los datos obtenidos en terreno, las capas corresponden a los trazos en la figura como rectángulos.

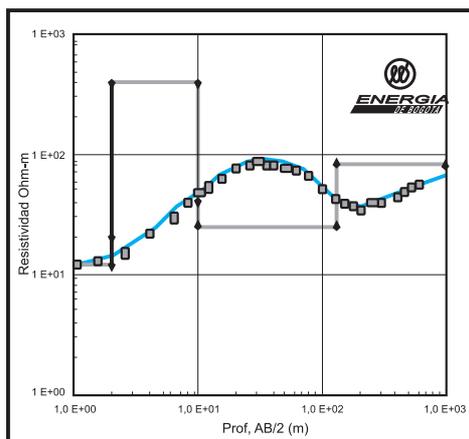


Figura 13. Interpretación de un SEV.

Los datos numéricos que se muestran a en la tabla 1, corresponden a los valores para el modelo de capas de la figura 13, indicando valores de resistividad, espesores de capas, y profundidad.

Tabla 1. Resultados del modelo.

CAPA	RESIST	PROF	ESPESOR
1	12	2	2
2	389	10	8
3	26	135	125
4	83		

### 4.6. Errores en la representabilidad del modelo obtenido con respecto a la realidad del subsuelo

Las propiedades eléctricas en conjunto con los parámetros geométricos de los materiales geológicos como espesor, profundidad, dirección, etc., determinan una sección geoelectrica, que caracteriza la geología de una determinada área.

Las superficies de separación de una sección geoelectrica no siempre coinciden con los límites

determinados por las características litológicas, genéticas y geológicas en general. Adicionalmente los resultados dependen de la precisión de los resultados obtenidos en campo, por la definición del modelo final resultante y la interpretación de esos datos.

Aunque el modelo de capas es bastante simple, tiene la ventaja de ser en la práctica sencillo y rápido, pero requiere del conocimiento geológico para conseguir una interpretación acertada.

Los diferentes métodos, técnicas y arreglos son utilizados algunas veces de manera inadecuada, aplicándolos a suelos con geología compleja, obteniendo como resultado un modelo de capas que es inapropiado y para el caso del sector eléctrico, estos métodos se emplean indistintamente, aún si los suelos no son estratificados, las capas no son horizontales, el suelo no es homogéneo e isotrópico, existen accidentes topográficos a lo largo del tendido, etc., todas estas características no corresponden a los supuestos en los que se desarrolla el modelo de capas.

## 5. Método de Tomografía Eléctrica Resistiva (TER)

La TER es desarrollada en la década delos 90, como resultado de la evolución del los métodos geoelectricos clásicos ya descritos e impulsada por el avance de los computadores que permiten hacer gran cantidad de cálculos en poco tiempo.

### 5.1. Principios básicos

Consiste en un perfil continuo de datos de resistividad del suelo, el cual permite adquirir información continua de áreas donde los métodos clásicos no dan resultados acertados, por ejemplo en donde capas de alta conductividad impiden la penetración electromagnética. La tomografía eléctrica es ampliamente utilizada para determinar variaciones laterales de la resistividad eléctrica del subsuelo, sobre aquellas áreas de estructura geológica compleja

Al emplear un arreglo lineal de electrodos la toma de información se realiza por niveles de datos, y en general, en cada nivel se utiliza una separación entre electrodos constante, y se aumenta a medida que crece el nivel de profundidad.

Para este caso se supone que no hay cambios geológicos y de resistividad en la dirección perpendicular a la sección de estudio.

En la Figura 14, se muestra la distribución de electrodos para un sondeo continuo lineal que emplea la configuración Wenner para la toma de información. La línea esta compuesta por 20 electrodos espaciados una distancia "a" entre sí, cada asterisco representa una lectura de corriente y potencial, por tanto un valor de resistividad aparente. La secuencia se realiza por niveles de datos, así para el primer nivel, la separación entre electrodos es de 1 m y se tienen un total de 17 lecturas. Culinada la toma de información en el primer nivel, se prepara el equipo para realizar las lecturas del segundo nivel, donde la separación entre electrodos debe ser igual a 2a y se tienen un total de 14 lecturas.

El proceso se realiza nivel por nivel hasta que el número de electrodos colocados así lo permitan. Se debe notar que cada electrodo sirve como emisor de corriente o medidor de potencial, según la geometría de electrodos dispuesta. Por ejemplo, en la primera lectura del primer nivel, los electrodos de corriente son los #1 y #4, y los de potencial los #2 y #3; mientras que para la primera lectura del segundo nivel los de corriente son los electrodos #1 y #7, y los de potencial los #3 y #5. A medida que se avanza sobre un mismo nivel de datos, el electrodo que sirvió como emisor de corriente en la lectura precedente se utiliza para medir potencial en la lectura siguiente.

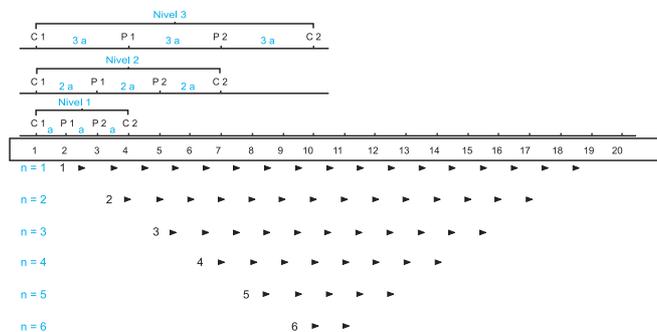


Figura 14. Arreglo de datos TER.

Usualmente un sondeo eléctrico vertical requiere pocas lecturas, mientras que en la TER emplea lecturas dependiendo del número de electros.

Como ejemplo, empleando un arreglo centrado convencional tipo Schlumberger, con apertura AB = 50 m, se requieren 7 lecturas para una profundidad de investigación de 25 metros aproximadamente, mientras que para una tomografía con la misma profundidad de investigación utilizando un arreglo Wenner-Schlumberger se requiere un tendido de 50 electrodos con separación de 2 metros entre cada electrodo y para este caso es necesario tomar 576 datos.

Los modelos bidimensionales permiten apreciar los cambios tanto horizontales como verticales del área en estudio. Al ejecutar un Sondeo Eléctrico Continuo, también llamado tomografía eléctrica resistiva (TER), se puede utilizar una de las dos más comunes metodologías de campo. Ambas siguen el mismo principio de los SEV, salvo que ahora el propósito es obtener la distribución de resistividades en una sección que ya puede ser no estratificada.

Una vez realizado el proceso de toma de datos, nos enfrentamos al proceso de obtención de un modelo de distribución probable de resistividades, que represente la forma geométrica en que están distribuidos los valores de resistividad en el subsuelo y que produzcan los mismos efectos que los datos adquiridos.

Describiremos aquí un método para realizar el proceso de inversión de la pseudosección de resistividad aparente, obtenida de los datos adquiridos. Este proceso fue propuesto por Loke & Barker en su artículo "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections" 1995. [2]

Este método, simplifica la realización de las rutinas y algoritmos de programación que permiten obtener un modelo del subsuelo, que representa la distribución de resistividades y que se comporta en forma equivalente al subsuelo real.

Describimos a continuación una técnica rápida, basada en el método de optimización por mínimos cuadrados, que requiere menos tiempo de cálculo que la mayoría de los métodos y produce modelos libres de distorsión causados por la geometría del arreglo de electrodos en la pseudosección original de resistividad aparente.

Es también relativamente insensible al ruido aleatorio en los datos. Esta técnica fue bautizada como "método de deconvolución por mínimos cuadrados", debido a que separa el efecto de la geometría del arreglo de electrodos, de los valores de resistividad aparente, que resultan de los valores de la resistividad del subsuelo medida.

Se asume que el modelo usado en la inversión de resistividad 2D, comprende un número de bloques rectangulares de resistividad constante, como el que se muestra en la figura 15, la aproximación convencional es usar un método de optimización no lineal iterativo para determinar la resistividad de los bloques.

El método de suavizado forzado por mínimos cuadrados (de Groot-Hedlin y Constable, 1990)

puede usarse para determinar la resistividad de los bloques rectangulares que minimizarán la diferencia entre las resistividades aparentes calculadas y las resistividades aparentes medidas.

La siguiente expresión se utiliza como ecuación de recurrencia en el proceso de inversión (Sasaki, 1989):

$$(J^T J + \lambda C^T C)p = J^T g \quad (14)$$

Donde J es la matriz jacobiana de las derivadas parciales,  $\lambda$  es el factor de amortiguamiento, g es el vector discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre los valores de resistividad aparente medidos y los calculados, y p es el vector de corrección a los parámetros del modelo.

El efecto del filtro C de aplanamiento 2D, es restringir la suavidad de los parámetros del modelo a algún valor constante (Sasaki, 1992). El logaritmo de los valores de resistividad del modelo se usa para el cálculo del vector de corrección p.

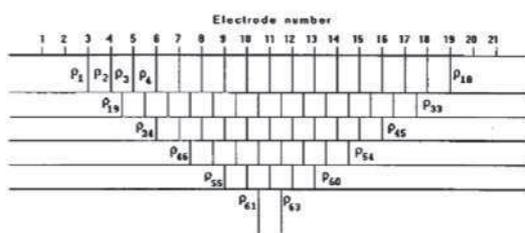


Figura 15.

El método de inversión puede ser dividido en tres pasos principales. El primer paso es calcular los valores de resistividad aparente para el modelo, esto normalmente se hace usando diferencias finitas (Smith and Vozoff, 1984) o elementos finitos (Sasaki, 1992). El segundo paso es calcular la matriz jacobiana de las derivadas parciales y el tercer paso es resolver el sistema no lineal de ecuaciones.

El método propuesto por Loke y Barker [2], [3] reduce el tiempo de cálculo requerido, ya que simplifica los dos primeros pasos (El cálculo del modelo inicial de resistividad aparente y sus derivadas parciales), consiste en suponer como modelo inicial un suelo homogéneo, con lo cual resulta innecesario el primer paso es decir el cálculo de un modelo de resistividades aparentes. El siguiente paso que es determinar los valores de las derivadas parciales, para este modelo se resuelve analíticamente usando la solución para el potencial y la función de Green.

Teniendo en cuenta la aproximación de Barker (1992), donde los bloques rectangulares son dispuestos de manera similar a los puntos de datos de la pseudosección de resistividad aparente. El número de bloques rectangulares es el igual al número de puntos de datos. La profundidad del centro del bloque se localiza en la media de la profundidad de investigación (Edwards, 1977) de el arreglo de electrodos, (aproximadamente 0.5 veces la separación de electrodos para el arreglo Wenner). Para algunos conjuntos de datos, pueden obtenerse mejores resultados usando un modelo con bloques mas delgados cercanos a la superficie y bloques mas gruesos cerca del fondo.

Las derivadas parciales  $\frac{\partial \Phi}{\partial \rho}$  para un bloque rectangular de dimensiones finitas está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = \frac{I_s}{4\pi^2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dx dy dz \quad (15)$$

O de manera simplificada como:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = \frac{I_s}{4\pi^2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} Fy dx dz \quad (16)$$

Donde:

$$Fy = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dy \quad (17)$$

Ecuación que puede determinarse analíticamente. Obteniéndose para valores de x mayores a 0.5 a

$$Fy = \frac{2}{\alpha\beta^2} \left[ \frac{\alpha^2 E(k) - \beta^2 K(k)}{(\alpha^2 - \beta^2)} - \frac{x\alpha[(\alpha^2 + \beta^2)E(k) - 2\beta^2 K(k)]}{(\alpha^2 - \beta^2)^2} \right] \quad (18)$$

Donde:

$$\alpha^2 = \beta^2 + z^2, \beta^2 = (x-a)^2 + z^2 \quad (19)$$

$$k = \frac{(\alpha^2 + \beta^2)^{0.5}}{\alpha} \quad (20)$$

Con  $\alpha > \beta > 0$  y E(k) y K(k) son integrales elípticas completas.

Para valores de x menores a 0.5 a tenemos:

$$Fy = \frac{2}{\alpha\beta^2} \left[ \frac{\alpha^2 E(k) - \beta^2 K(k)}{(\alpha^2 - \beta^2)} + \frac{\alpha(x - \alpha)[(\alpha^2 + \beta^2)E(k) - 2\beta^2 K(k)]}{(\alpha^2 - \beta^2)^2} \right] \quad (21)$$

Donde:

$$\alpha^2 = (x - a)^2 + z^2, \beta^2 = x^2 + z^2 \quad (22)$$

Cuando x es igual a 0.5 a se tiene:

$$Fy = \pi \left[ \frac{1}{2\alpha^3} - \frac{3\alpha^2}{\alpha^5} \right] \quad (23)$$

Entonces se debe calcular los valores de las derivadas parciales para un bloque rectangular de dimensiones finitas, se debe realizar una integral doble de la ecuación 16 sobre los valores apropiados de x y z, sin embargo, las integrales de las ecuaciones 18 y 21 se deben evaluar numéricamente usando la Cuadratura Gaussiana para integrales múltiples.

En la figura 16 se resume el procedimiento para el procesamiento de información y obtención del modelo geométrico que se muestra en la figura 17. Avellaneda [9].

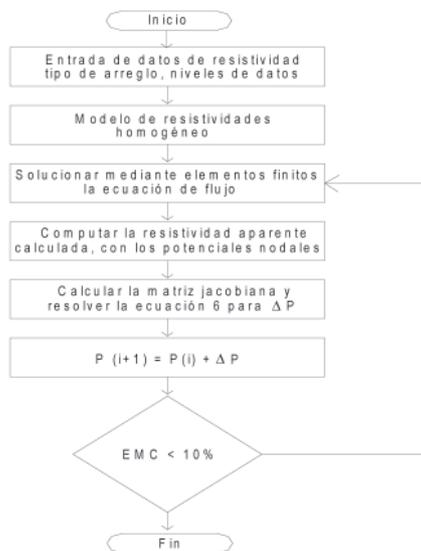


Figura 16. Diagrama de flujo para la obtención del modelo geométrico.

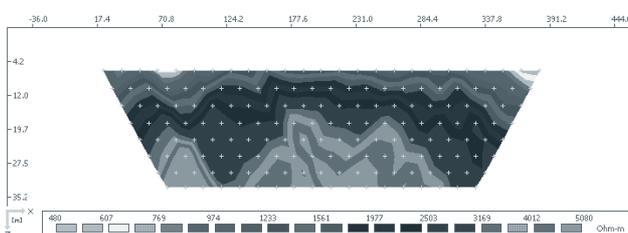


Figura 17. Resultado de la interpretación.

## 5.2. TER, programación de la toma de datos en terreno

Además de los requerimientos expuestos para el proceso de adquisición de datos geofísicos, es recomendable:

- Ejecutar un algoritmo para determinar la secuencia en que se van a tomar las mediciones y la representación gráfica de la distribución de puntos.



Figura 18. Distribución bidimensional de puntos a los cuales se les obtendrá el valor de resistividad.

- Llevar en copia dura las tablas de toma de datos y archivos .TXT. al sitio de estudio.

Tabla 2. Fracción del formulario de toma datos.

Electrodos corriente		Electrodos potencial		mV	mA
1	4	2	3		
1	6	3	4		
2	5	3	4		
1	8	4	5		
2	7	4	5		
3	6	4	5		
1	10	5	6		
2	9	5	6		
3	8	5	6		
4	7	5	6		
1	12	6	7		
2	11	6	7		
3	10	6	7		
4	9	6	7		
5	8	6	7		

## 5.3. Herramientas y equipos requeridos

- Equipo de tomografía.
- Computador portátil con autonomía suficiente para la toma de información.
- Brújula
- GPS

- Cinta métrica
- Cámara.
- Herramientas de mano.
- Carpa.
- Material de seguridad industrial.
- Radios portátiles.

#### 5.4. Proceso de toma de información en terreno

- Ubicación de equipos.
- Tendido de cables.
- Hincado de electrodos.
- Prueba de conectividad de electrodos ordenada desde el equipo de inyección.
- Toma de información.
- Verificar en cada medida que el valor del SP se encuentre estable para que pueda ser eliminado.
- Una vez terminada la recolección de información se ejecuta un algoritmo de verificación, el cual supone que en puntos adyacentes la variación de la resistividad no puede exceder  $\pm 25\%$ , en caso de presentarse variaciones mayores se despliega un listado de puntos a los cuales debe repetirse la toma de datos, en caso de coincidir el valor se toma como cierto o se reemplaza.



Figura 19. Toma de datos en terreno.

#### 5.5. Pre proceso

El método que hemos utilizado es conocido como Wenner-Schlumberger, para este método describimos el primer paso de organización de la información.

- A todas las parejas de datos adquiridos se les calcula el valor de la resistividad aparente.
- Se hace un ordenamiento por capas, esto es, para la separación de electrodos "a" se le asigna la primera capa, separación "2a" la segunda

- capa y así sucesivamente hasta la capa "n".
- Se convierte esta información en un archivo plano.
- Se lee el archivo plano, se procesa la información obteniendo una imagen bidimensional.
- En el informe se incluyen los hallazgos geológicos, información geológica del área identificando materiales del subsuelo y las características eléctricas y estratigráficas.

## 6. Desarrollo instrumental

Para la realización de estudios de tomografía resistiva y SEVs, los autores de este artículo han desarrollado y construido varias versiones instrumentales, para la adquisición de datos en terreno en prospección 2D. Sin embargo, se continúa trabajando en el desarrollo instrumental y software para toma de datos y procesamiento con el objetivo de obtener modelos 3D.

A continuación se reseña la historia del desarrollo instrumental:

### 6.1 Primera versión

Incluía un transformador variable un sistema de rectificación y filtraje con condensadores, este equipo presentaba entre otros los siguientes problemas: los datos obtenidos en campo presentan errores debidos al riple de la fuente, además de la lectura de potencial y corriente inyectada se hacía necesario recolectar la información del SP para luego descontarla de la lectura de potencial, el equipo era muy pesado y requería una planta eléctrica para su alimentación, lo cual resultaba impráctico.

Adicionalmente para la toma de datos hubo necesidad de construir muchos arreglos de conductores con las aperturas definidas que había que ir moviendo manualmente para poder barrer todo el perfil, este hecho ocasionaba mucha demora en la recolección de información.

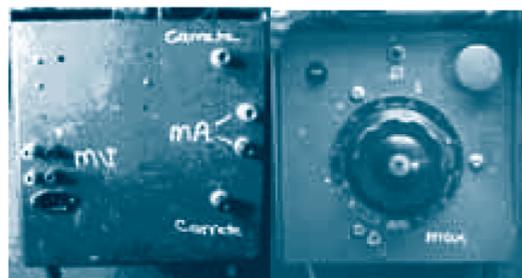


Figura 20. Primer desarrollo instrumental.

### 6.2. Segunda versión

Se construyó utilizando una fuente conmutada PWM, permitía la selección semiautomática de arreglos, con lo cual se mejora en la calidad de la información adquirida, presentaba los siguientes problemas: el número de conmutaciones de electrodos era muy reducida, por lo tanto las TER no tenían buena resolución y la eliminación de SPs se realizaba mediante la suma o resta de un potencial de compensación.

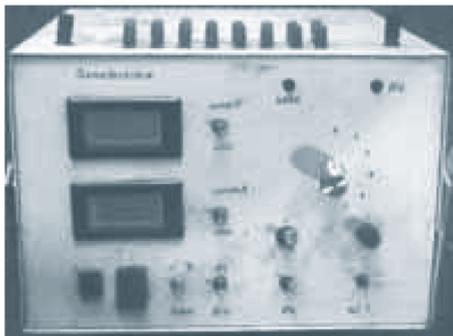


Figura 21. Segundo desarrollo instrumental.

### 6.3. Tercera versión

Similar a la versión anterior, pero con interfase a PC, lo que permitía hacer las lecturas de manera automática con una reducción importante en el tiempo para la toma de información, adicionalmente permitía la eliminación automática de la lectura el SP, para la cual se empleaba un procedimiento que consistía en guardar en memoria del PC el valor del SP y luego cuando el PC ordenaba inyectar corriente, el potencial leído se compensaba con el valor del SP, pero con signo contrario. Este desarrollo permitió un gran avance en el proceso de toma de información, sin embargo la eliminación automática del SP no es funcional para todos los terrenos, dado que, en algunos casos p.e en arcillas y en especial en electrodos consecutivos de voltaje y corriente, luego de una inyección existe un proceso de polarización que se degrada lentamente y la eliminación automática de SP se realiza cuando existe un lo cual ocasiona errores en la toma de información.



Figura 22. Tercer desarrollo instrumental.

### 6.4. Versión Actual

El último equipo de inyección y recolección de información consiste en una unidad básica de inyección de corriente, similar a las empleadas en los dos casos anteriores, opera con baterías estacionarias, puede funcionar 12 horas continuas cuando se realizan SEVs y 6 horas continuas cuando se adquieren datos de tomografía.



Figura 23. Actual desarrollo.

El voltaje de salida es seleccionable manualmente y opera entre 10 y 400 VDC o con ciclos de conmutación de polaridad cada 10 segundos. Se trata de un convertidor DC a DC empleando la técnica de PWM. Para la selección de electrodos de tensión o de corriente se desarrollaron dos módulos: uno automático que se opera desde un PC a través de una interfase serial RS232 y la programación de conmutación de electrodos es asignada desde un archivo .txt,

El sistema de procesamiento automático está equipado con un microprocesador que permite comunicación con un PC, maneja dos conversores análogos digital de 16 bits uno para la lectura de potencial y otro para la lectura de corriente y 80 salidas digitales, 40 para la conmutación de electrodos de corriente y 40 para la conmutación de electrodos de potencial.

El segundo módulo desarrollado es una caja de conmutación manual construida mediante interruptores que permiten seleccionar los electrodos de corriente y las mediciones de potencial con instrumentos externos.



Figura 24. Consola de conmutación manual.

Se construyeron dos juegos de cables uno para separación de electrodos de 1 metro y otro para separación de electrodos de 2 metros, ambos juegos permiten utilizar arreglos hasta de 40 electrodos. Los electrodos de corriente son varillas de acero. Los electrodos de potencial pueden ser varillas de acero, en este caso, el registro se realiza de manera manual para poder eliminar potenciales espontáneos (SP), pares galvánicos y ruidos por mal contacto etc. También es posible conectar electrodos no polarizables de cobre sulfato de cobre (Cu-CuSO<sub>4</sub>), sin embargo la adquisición automática al igual que en el caso anterior no siempre permite un buen control y eliminación de los SP's y los ruidos aleatorios.



Figura 25. Electrodo no polarizables de cobre sulfato de cobre.

## 7. Aplicaciones

La TER, se ha aplicado apropiadamente en el diseño de sistemas de tierra, mejoramiento de tierras, estudio complementario para la evaluación geotécnica y riesgos de deslizamiento, estudios geotécnicos y diseño de sistemas de protección catódica por corriente impresa y ánodos de sacrificio.

### 7.1. Diseño de la resistencia de puesta a tierra para torres de transmisión nuevas

Para el diseño de puesta a tierra en estructuras nuevas, se busca determinar el tipo de material, el valor de la resistividad del suelo y la litología en el sitio en el cual se instalará la torre, con el fin hacer un adecuado diseño de puesta a tierra.

Para este propósito realizamos tomografías en cruz de tal manera que el tendido cruce las 4 patas de la torre, esto nos permite tener un conocimiento del valor de la resistividad en los cuatro sitios de amarre.

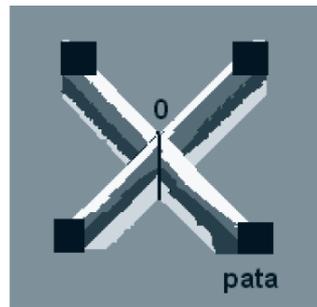


Figura 26. Detalle de tendido en sitio de torre para el diseño de la puesta a tierra.

### 7.2. Diseño de Mallas de puesta a tierra en subestaciones

En el cálculo y diseño de mallas de puesta a tierra el uso la TER presenta grandes ventajas frente a los SEV's, dado que, nos permite tener una visión continua en un plano bidimensional.

Para un mejor conocimiento del subsuelo se pueden hacer muchos cortes paralelos a lo largo de la subestación o realizar una TER 3D.

Para comprender la ventaja de este método, presentamos un ejemplo metodológico, suponiendo que el perfil que se muestra en la figura 27, corresponde a un corte geológico de una subestación y que se mantiene las condiciones mostradas en toda el área de la subestación, los valores de resistividad son indicados en colores.

Se cuenta con la siguiente información de la malla de tierra:

- Resistencia de puesta a tierra recomendada < 1 Ω.
- Longitud de conductor a enterrar 3050 m.
- Diámetro del conductor de cobre 19 mm.
- Profundidad de enterramiento del conductor de tierra 1.2 m.
- No se emplea suelo artificial para mejoramiento de la puesta a tierra.
- Resistividad del suelo equivalente en la cama del conductor 4225 Ω-m.

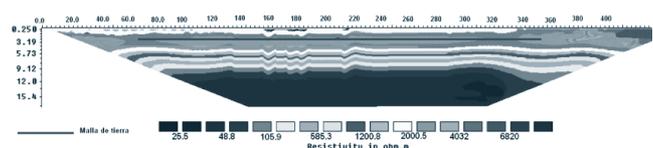


Figura 27.

Para estas condiciones el valor calculado para la resistencia de puesta a tierra es de 3.3 Ω, por lo tanto, de acuerdo con lo recomendado de 1 Ω no cumple y requiere mejoramiento de la puesta a tierra. Presentamos 2 opciones: a) enterrar mas

conductores horizontales o b) dado que, con la información de la TER podemos observar valores de resistividad más bajos en la parte inferior, se propone perforar hasta alcanzar zonas de < resistividad.

Para el caso a), una primera iteración enterrar 6000 m de cable, la resistencia de puesta a tierra de la subestación es de 2.04 Ω, no cumple. Una segunda iteración, enterrar 12000 m de cable, la resistencia de puesta a tierra es de 1.1 Ω, aún no cumple.

Para el caso b) optimizamos el diseño, partimos de la malla inicia, compuesta por 3050 m de conductor y le agregamos 5 contrapesos verticales de 20 metros cada uno (80 metros de perforación vertical), hasta alcanzar suelos con valores de resistividad de 30 Ω-m, en esta condición el valor calculado de la resistencia de puesta a tierra de la subestación es e 0.88 Ω que cumple con el requerimiento que sea << de 1 Ω, la aplicación se muestra en la figura 28.

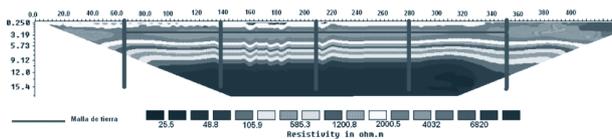


Figura 28.

Como puede observarse, en el primer caso enterrar más de 12000 m de conductor de cobre es impráctico y costoso. El segundo caso, hincar 5 contrapesos verticales de 20 metros cada uno es más razonable, menos costoso y se obtiene mejores resultados.

### 7.3. Mejoramiento de Puesta a tierra en torres de transmisión

La TER se ha empleado en el diseño de puestas a tierra en estructuras en las que se ha detectado evidencias de flameos inversos.

Generalmente estas estructuras se encuentran hincadas en suelos altamente resistivos como areniscas.

Mediante la TER se hacen mapas de isoresistividad obteniéndose información longitudinal y en profundidad, se ubican los sitios de menor valor de resistividad en donde se colocan los contrapesos, algunas veces es posible que la solución solo requiera perforaciones verticales para alcanzar suelos más profundos con valores de resistividad

más bajos, en otros casos se extiende longitudinalmente contrapesos por los suelos con menores valores de resistividad.

Es importante conocer la localización de contrapesos existentes, dado que la presencia altera los resultados de la tomografía. En la figura 29 se muestra el procedimiento para el caso en el cual no existen contrapesos, la distancia d corresponde a la mitad del tendido para evitar interferencias con la torre.

Para ilustrar la ventaja de este método suponemos que tenemos una estructura en la cual su puesta a tierra es de 80 Ω, presenta problemas con la quema de aisladores por flameo inverso originado por descargas atmosféricas y nos proponemos a realizar un mejoramiento de puesta a tierra de tal forma que la resistencia sea < de 20 Ω. El perfil de resistividades del subsuelo es como el que se muestra en la figura 30, con las observaciones de campo y los valores de resistividad de la tomografía encontramos que el material a la derecha corresponde a un depósito de arcilla y el de la izquierda arenas.

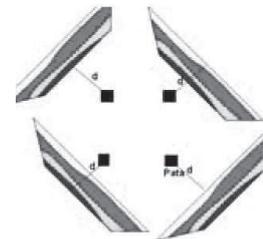


Figura 29. Detalle de tendidos para el mejoramiento de puesta a tierra de estructuras existentes.

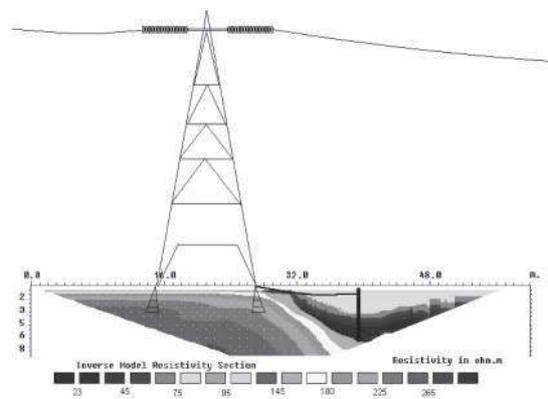


Figura 30. Mejoramiento de puesta a tierra.

Con el perfil que mostrado escogemos la zona con valores de menor resistividad (arcillas), que se encuentran a la derecha de la estructura, el valor de la resistividad en la parte superficial es de  $75 \Omega$  y el mas profundo, por debajo de 3 metros es de  $23 \Omega$ , existen dos opciones colocar un contrapeso horizontal en la zona de  $23 \Omega$  o hincar un contrapeso vertical a 5m que alcance zonas de menor valor de resistividad, dado que el material es arcilla, es posible hincar el electrodo a golpe y el ejemplo lo hemos considerado para este escenario. Proponemos como solución enterrar en dos sitios dos varillas de 2.4 m unidas para formar una barra de 4.8 m, el valor de la resistencia de puesta a tierra calculada para estos contrapesos es de  $6.8 \Omega$  que cumple con el requerimiento.

### 7.4. Diseño y evaluación de la resistencia de puesta a tierra en estructuras de transmisión

Dado que el equipo diseñado permite programar los electrodos por los que se inyecta corriente y los electrodos por los cuales se mide el potencial, nos ha permitido de una manera rápida obtener mediciones de puesta a tierra por el método de la caída de potencial conocido como el método del 61.8% como se muestra en la figura 31.

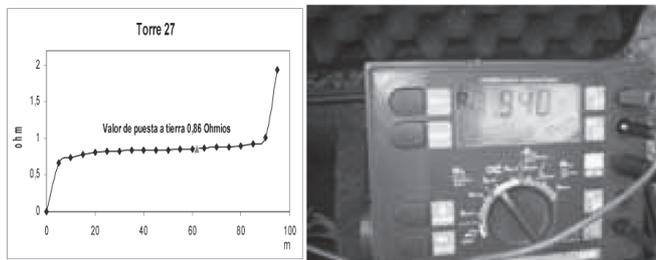


Figura 31. Medición de la puesta a tierra

### 7.5. Otras aplicaciones

#### 7.5.1. Evaluación de Riesgos de deslizamiento

El método de la TER y los SEVs se han empleado para la caracterización de suelos en los cuales se ha presentado deslizamientos con el fin de localizar la roca no alterada o encontrar el volumen y forma del material del talud. Esto ha permitido recomendar el traslado de las estructuras a sitios con menor riesgo de deslizamiento. En la figura 32 se muestra una serie de obras que se realizaron como medida geotécnica de estabilización del talud en una torre de la Empresa de Energía e Bogotá, pese a la magnitud de las obras realizadas y dado que, el material de de esta zona es fácilmente

alterable por las aguas lluvias y el incremento de la presión poral, el talud volvió a activarse y a amenazar a la estructura.



Figura 32. Obras de estabilización que fallaron.

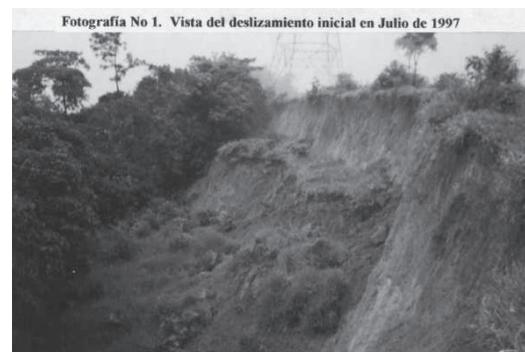


Figura 33. Reactivación de fallas en el talud.

Se procedió a realizar tomografías y SEV's para localizar el volumen del material o la roca dura. De los estudios se concluyó que hasta el sitio de torre el tipo de material es arenarcilloso fácilmente erosionable y no se encontró roca dura, por lo tanto se determinó realizar una variante.

#### 7.5.2. Evaluación de suelos corrosivos y diseños de protección catódica

Existen procesos químicos de degradación de estructuras enterradas y estos dependen del contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc.

Cuando se estudia la influencia de la corrosión en un medio en el cual se instalarán materiales ferrosos como el caso de estructuras de transmisión, es necesario investigar las características del medio relacionada directamente con el fenómeno corrosivo, como la resistividad y el PH entre otras. Las áreas de menor resistividad son las que tienden a crear zonas anódicas en la estructura y las que tienen mayor riesgo de corrosión. Es práctica común utilizar los siguientes criterios de resistividad del suelo para su clasificación como suelo corrosivo o inerte.

Tabla 3. Resistividad del suelo y corrosión.

Resistividad Ohm-m	Características
< 9	Muy corrosivo
9a23	Corrosivo
>23 a 50	Moderadamente corrosivo
>50 a 100	Medio corrosivo
>100	Menos corrosivo

En la práctica suele utilizarse comúnmente el valor de la resistividad eléctrica del suelo como índice de corrosión, en algunos casos, en especial en zonas de influencia de ríos contaminados o sitios con presencia de corrosión en estructuras, se han realizado estudios de TER y/o SEVs, con el fin de caracterizar eléctricamente el subsuelo desde el punto de vista de la corrosión y recomendar fundaciones en concreto o en algunos casos, además de un sobre galvanizado y el empleo de pinturas especiales, se han empleado ánodos de sacrificio para proteger las estructuras enterradas, especialmente cuando la resistividad es baja y aprovechando que el área de estructura metálica a proteger es muy poca y por lo tanto requiere baja corriente de protección.

### 8. Conclusiones y recomendaciones

Cuando se apliquen los métodos tradicionales en general conocidos como SEV's (Wenner, Shlumberger etc.) se debe tener cuidado en las condiciones requeridas para que los resultados tengan aplicación efectiva, teniendo presente que existen escenarios geológicos donde no son aplicables.

En la última década se ha dado un gran desarrollo de los métodos geoelectricos en general impulsados por el desarrollo informático, esto ha generado metodologías mas efectivas y rápidas que aportan mucha mas información en los sitios de estudio sobre las estructuras, estratigrafía, composición y características físicas y litológicas del subsuelo, no incluidas en las normas IEEE 80 y 81 a las cuales hace referencia el RETIE ni en este último.

Los estudios geoelectricos han evolucionado hasta el método conocido como tomografía eléctrica resistiva (TER), el cual para el caso particular del sector eléctrico, contribuye a la optimización de las investigaciones y valoración de estudios de resistividad de suelos para diferentes aplicaciones.

Suministra información de la geometría del

subsuelo como: distribución espacial, en profundidad, la estructura, distribución de resistividades, alteración de suelos, fracturamiento, identificación de fisuras o fallas, etc, adicionalmente la representación de los resultados es fácilmente visualizable.

Es importante la estandarización de esta metodología, para que se pueda utilizar como una herramienta mas efectiva en la valoración de las características geoelectricas, especialmente en suelos con geología compleja.

Difundir al interior del sector eléctrico este tipo de metodologías en la solución de problemas tanto de puestas a tierra, protección contra la corrosión, y estabilidad geotécnica.

En la actualidad existen comercialmente una amplia variedad tanto equipos y programas (software) que realizan eficientemente el proceso tanto de toma de datos como de interpretación.

La Empresa de Energía de Bogotá, ha venido aplicado apropiadamente la Tomografía Eléctrica Resistiva, en el diseño de sistemas de tierra, en la evaluación y mejoramiento de tierras, en estudios complementario para la evaluación geotécnica y riesgos de deslizamiento, en estudios geotécnicos para la definición de espesores de material, diseño de cimentaciones de estructuras en fundación o en parrilla y diseños de protección catódica,

En las siguientes tablas se hace un resumen de las principales ventajas y desventajas de los SEV's y de la TER.

Tabla 4. Ventajas del los SEV's vs TER.

SEV's vs TER	
Ventajas	Desventajas
-Requerimiento de equipo sencillo. -Es la técnica más conocido y usado en el sector eléctrico. -Menores tiempos de adquisición y procesamiento. -Menores tiempos de proceso. -Mas económico	-No es aplicable a todos los suelos indistintamente. -Los resultados no siempre coinciden con la estratigrafía del subsuelo. -El modelo geológico solo identifica la geología del punto central del arreglo. -Un suelo con geología compleja puede ser modelado como un suelo conformado por capas horizontales, lo que da lugar a falsos diseños. No puede corregir los efectos de la topografía

Tabla 5. Ventajas del las TER vs SEV`s.

Tomografía Eléctrica	
Ventajas	Desventajas
-Buena resolución horizontal y vertical -Permite la corrección topográfica -Mayor cobertura areal. -Los resultados de la TER presentan en una imagen que facilita la comprensión. -Permite realizar el levantamiento de resistividades aún en suelos de geología compleja. -El uso de los resultados de la TER llevan a una optimización de los diseños, de puestas a tierra en los cuales la reducción de costos puede ser muy significativa. -Permite la utilización en otras aplicaciones como geotécnicas y de corrosión.	-Mayores requerimientos de equipo. -Uso de software más especializado y costoso. -Mayor tiempo de adquisición y procesamiento. -Es una tecnología nueva.

## 9. Referencias

[1] Interpretation of Resistivity Data. Robert G. Van Nostrand and Kenneth L Cook, Geological Survey Professional Paper 499, 1966.

[2] Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, M.H. Loke and R.D. Barker, 1995

[3] Geosundig Principles 1: Resistivity sounding measurement. Elsevier Science Publishing Company, Koefoed, O., 1979.

[4] Approximate inverse mapping in DC resistivity problems. Li Y. and Oldenburg, D.W. 1992.

[5] Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Loke, M.H. and Barker R.D. 1996.

[6] Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Paraninfo, Madrid España, Orellana, Ernesto. 1972.

[7] Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Frank C. Frischknecht, y otros. 1988.

[8] Modelación del problema inverso en Geoeléctrica 2D mediante Elementos Finitos. Luis Alberto Briceño Guarupe. 2000.

[9] Solución al problema Inverso en Geoeléctrica continua Mediante Elementos Finitos. Mauricio Avellana y Fredy Pérez. Universidad Nacional de Colombia, 2000.

[10] Normas ANSI/IEEE Standard 80 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.

[11] Normas ANSI/IEEE Standard 81, Guide for measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface, 1983.

[12] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 2005.