

## RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUBSUELO DEL VOLCÁN GALERAS

Ramos Arteaga S.M, Rugeles Pérez A., Salazar Portilla L.B.  
*Universidad de Nariño*

### RESUMEN

Aplicando un método de electromagnetismo transitorio y utilizando un modelo de tierra plana de  $N$  capas, se obtiene un mapa de la resistividad eléctrica del subsuelo del anfiteatro del volcán Galeras.

### ABSTRACT

With the aid of a transient electromagnetic method and applying a model of flat earth of  $N$ - layers is obtained the electric resistance distribution in Galeras volcano.

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Generando campos electromagnéticos artificiales sobre la superficie de la tierra, y analizando la respuesta del subsuelo a dichos campos es posible obtener información acerca de la resistividad eléctrica que permita conocer la estructura geológica del volcán.

### MARCO METODOLÓGICO Y TEÓRICO.

En las mediciones de voltaje utilizadas como punto de partida para el cálculo de la resistividad eléctrica se utilizó un método de electromagnetismo transitorio [1]. El montaje para las mediciones consiste en un transmisor y un receptor, ambos ubicados sobre la superficie del anfiteatro del volcán Galeras. El transmisor es una espira simple cuadrada de 50 metros de lado por la cual inicialmente fluye una corriente de 3A.

En un cierto tiempo la corriente directa se interrumpe abruptamente originando un cambio temporal de flujo magnético. Este flujo magnético variable sirve de fuente a un campo electromagnético transitorio primario. La interrupción se modela como una función del tiempo tipo rampa, con una duración de la rampa de  $3\mu\text{s}$ . A su turno, el campo electromagnético primario induce corrientes de conducción en el subsuelo, las cuales crean un campo electromagnético secundario dependiente, entre otros factores, de la resistividad eléctrica de la tierra. Por lo tanto, este campo secundario contiene información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo. El campo electromagnético secundario decae debido al carácter transitorio del campo electromagnético primario, como también a las pérdidas óhmicas a que están sujetas las corrientes inducidas en la tierra conductiva.

El receptor es una bobina circular de varias vueltas de 1m de diámetro y se ubica en el centro de la espira transmisora. Seguidamente se mide el decaimiento de voltaje inducido en la bobina por el campo electromagnético secundario. La primera medida de voltaje se realiza a los  $6,8\mu\text{s}$  después de la interrupción de la corriente directa en el transmisor, luego de contabilizan 19 medidas más, a tiempos espaciados exponencialmente según la relación:

$t = \exp(0,244n + 1,688)$  siendo  $n = 1, 2, 3, \dots, 20$  el número de orden de la medida. La última medida corresponde al tiempo  $t = 707 \mu s$ .

De la interpretación teórica de los datos de voltaje con respecto al tiempo se obtiene un conocimiento de la resistividad del suelo. Con este fin, el transmisor en forma de espira cuadrada se aproxima a una espira circular de área equivalente. Esta aproximación facilita los cálculos y se justifica ya que el receptor se encuentra a una distancia grande del transmisor. De otra parte, los decaimientos de voltaje inducidos en la bobina receptora, de acuerdo con la ley de Faraday, son iguales a la derivada temporal de la componente vertical del campo magnético  $h_z(t)$  en el centro del transmisor. Se puede obtener una expresión para  $h_z(t)$  utilizando un modelo de tierra plana homogénea con las siguientes características:

1. Para  $z < 0$  se tiene un espacio con aire que se considera equivalente al espacio libre cuya permitividad y permeabilidad se designan respectivamente como  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ .
2. Para  $z > 0$  se considera una tierra plana homogénea no magnética con permitividad  $\epsilon$ , permeabilidad  $\mu = \mu_0$  y resistividad  $s$ .

La corriente directa  $I_0$  en el transmisor, que es interrumpida abruptamente en un  $t=0$ , se expresa con la ayuda de la función de paso  $u(t)$ :

$$I(t) = I_0 (1 - u(t)) \quad t \geq 0 \quad (1)$$

La componente  $h_z(t)$  representa la respuesta del sistema a esta interrupción. Como el sistema considerado es lineal y casual teniendo en cuenta (1),  $h_z(t)$  está dada por [2]:

$$h_z(t) = f(\infty) - f(t) \quad t \geq 0 \quad (2)$$

donde  $f(t)$  es la respuesta a la función de paso  $u(t)$ .  $f(t)$  se encuentra a partir de la función del sistema que es la misma componente vertical del campo magnético  $h_z(t)$ , pero en el dominio de la frecuencia  $H_z(w)$ . En la región de bajas frecuencias (aproximación cuasiestática) se tiene que:

$$H_z(w) = \frac{I_0}{k^2 a^3} \left[ 3 - (3 + 3Ika - k^2 a^2) \exp(-ika) \right] \quad (3)$$

donde  $k = \sqrt{-i\mu_0 \sigma w}$  y  $a$  el radio de la espira. Sustituyendo  $s = iw$  en (3) se obtiene:

$$H_z(s) = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3 s} \left[ 3 - (3 + 3a\sqrt{\mu_0 \sigma s} + \mu_0 \sigma s a^2) \exp(-\sqrt{\mu_0 \sigma s} a) \right] \quad (4)$$

y  $f(t)$  se calcula a partir de

$$f(t) = L^{-1} \left[ \frac{H_z(s)}{s} \right] \quad (5)$$

donde  $L^{-1}$  es la transformada inversa de Laplace. De (4) y (5) se concluye que:

$$f(t) = \frac{I_0}{2a} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \operatorname{erf}(\theta a) - \frac{3}{\sqrt{\pi} \theta a} \exp(-\theta^2 a^2) \right] \quad (6)$$

donde  $\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}$  y  $erf(\theta a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\theta a} \exp(-v^2) dv$  es la función de error.

Por último, sustituyendo (6) en (2) se obtiene la componente vertical del campo magnético en el centro de la espira:

$$h_z(t) = \frac{I_0}{2a} \left[ \frac{3}{\sqrt{\pi} \theta a} \exp(-\theta^2 a^2) + \left( 1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) erf(\theta a) \right] \quad (7)$$

Como se indicó anteriormente, el voltaje inducido en la bobina receptora es igual a la derivada temporal de  $h_z(t)$ . Derivando (7) se tiene:

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = -\frac{I_0}{\mu_0 \sigma a^3} \left[ 3erf(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) \exp(-\theta^2 a^2) \right] \quad (8)$$

El lado izquierdo de (8) representa el voltaje inducido y en el lado derecho están involucrados el tiempo y las cantidades  $I_0$ ,  $\mu_0$ ,  $a$  y  $\sigma$ . La expresión (8) proporciona el voltaje en función del tiempo para un modelo de tierra plana homogénea.

Para cada tiempo  $t$  en el cual se ha registrado una medida de voltaje, existe un valor de la resistividad  $\sigma$  tal que para éste, el voltaje dado por (8) concuerda con el voltaje medido que corresponde a una tierra ideal no homogénea. A este valor de resistividad  $\sigma$  se le denomina resistividad aparente.

A partir de los datos de la resistividad aparente se deduce la distribución de la resistividad del subsuelo, es decir la resistividad real como una función de la posición. Este problema se resuelve por el método de inversión de datos electromagnéticos de una fuente controlada. Para la inversión se utiliza un modelo de tierra plana estratificada de  $N$  capas de espesores y resistividades desconocidas, las cuales se calculan de tal manera que reproduzcan lo más cerca posible los datos de las mediciones [3].

### RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se realizaron mediciones de voltaje en 28 puntos, cubriendo un área de 150 m. x 350m. Para cada punto se elaboró una gráfica de decaimiento de voltaje vs. tiempo (Fig.1). Luego, utilizando (8) se realiza el paso de voltaje medido a resistividad aparente. La Fig 2 muestra una gráfica de resistividad aparente vs. tiempo. Cada gráfica de resistividad aparente se utiliza para construir un modelo de  $N$  capas con base en un proceso de inversión de datos.

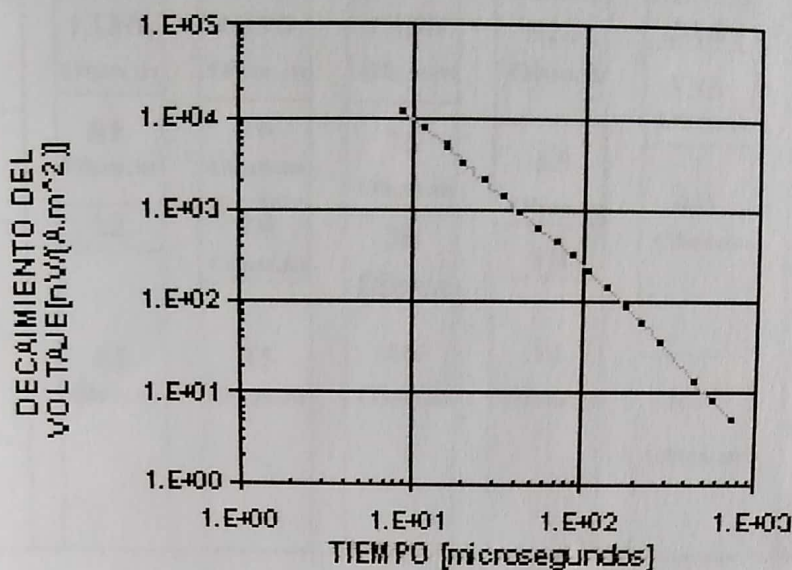


Figura 1. Voltaje inducido en la bobina receptora vs. tiempo (escala logarítmica).

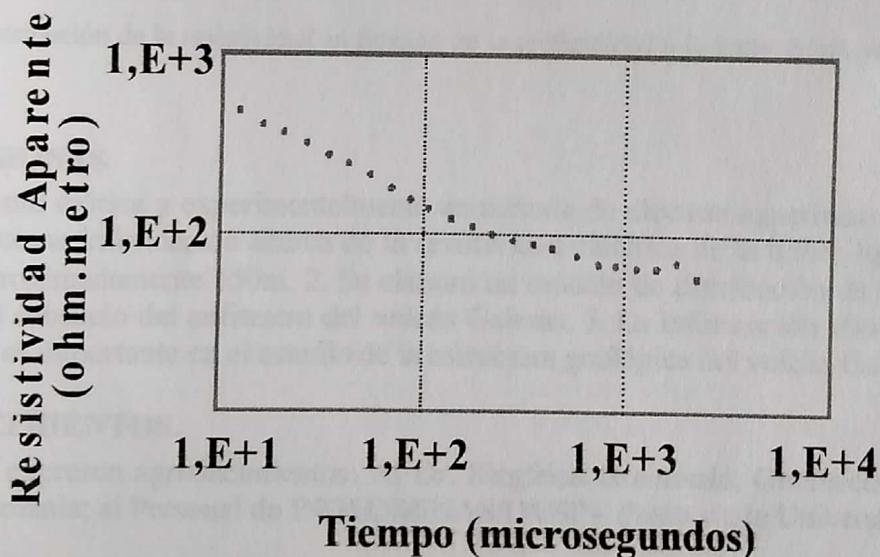


Figura 2. Gráfica de resistividad aparente vs. tiempo, correspondiente a la gráfica de voltaje de la Fig. 1.

Como resultado de la inversión se obtiene bajo cada punto los valores de la resistividad por capas. En la Fig. 3 se muestra la distribución de la resistividad por capas a lo largo de un perfil de exploración formado por siete puntos de mediciones de voltaje. Además, se debe indicar que el conjunto de valores de resistividad por capas bajo cada punto conforma un mapa global de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo del anfiteatro del volcán Galeras.

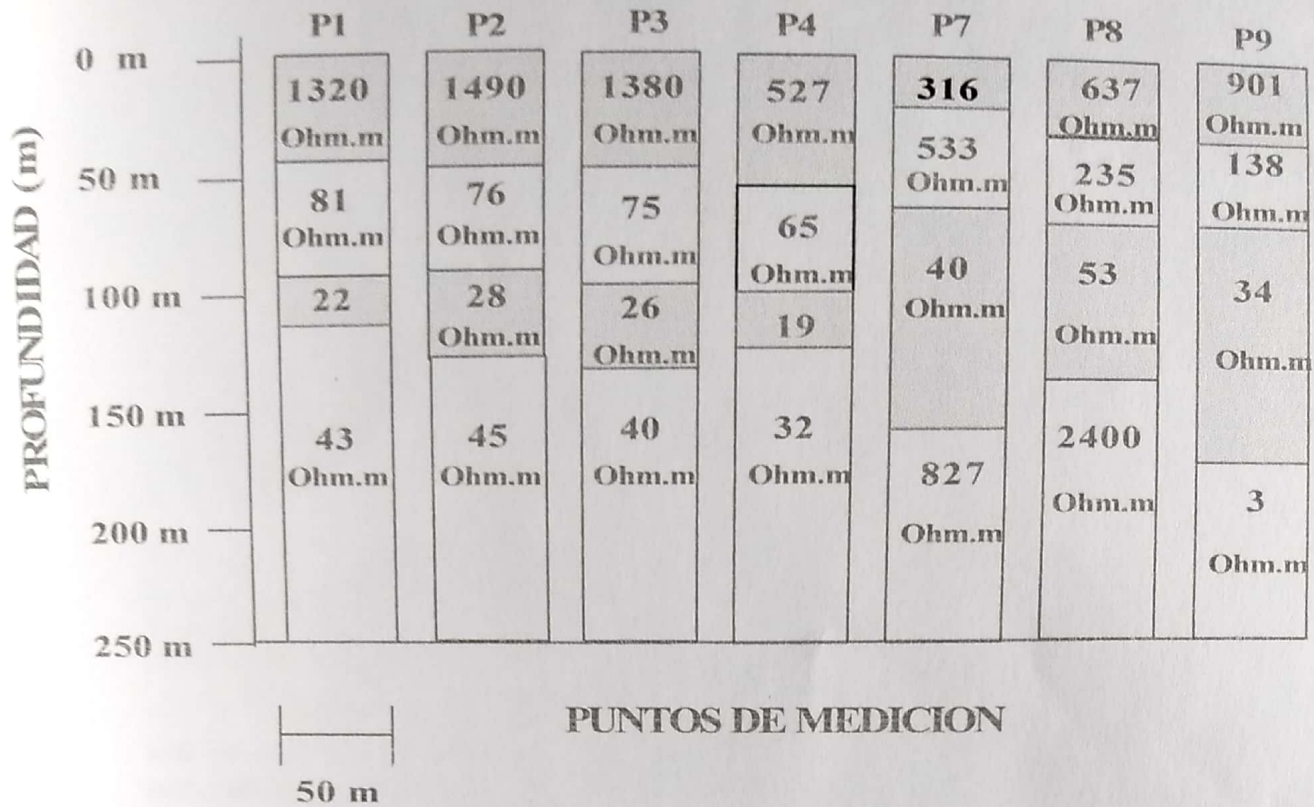


Figura 3. Distribución de la resistividad en función de la profundidad a lo largo de un perfil de exploración.

### CONCLUSIONES

Se implementó teórica y experimentalmente un método de electromagnetismo transitorio, el cual proporciona información acerca de la resistividad eléctrica de la tierra hasta profundidades de aproximadamente 150m. 2. Se elaboró un modelo de distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo del anfiteatro del volcán Galeras. 3. La información obtenida sobre la resistividad es importante en el estudio de la estructura geológica del volcán Galeras.

### AGRADECIMIENTOS.

Los autores expresan agradecimientos: Al Dr. Siegfried Greinwald, Geofísico del Instituto BGR de Alemania; al Personal de INGEOMINAS OVSP – Pasto y a la Universidad de Nariño.

### REFERENCIAS

- [1]. Greinwald S., Transient Electromagnetics, BGR, Hannover, Alemania 1995.
- [2]. Hwei P. Shu. Análisis de Fourier. Addison Wesley Iberoamericana 1987.0
- [3] Electromagnetic Methods in applied Geophysics. Edited by Mísac N. Nabigan, Society of Exploration Geophysicists, 1987.