

---

## TOMOGRAFIA GEOELECTRICA: DOS EJEMPLOS EN LA SABANA DE BOGOTA

---

**CAMILO ERNESTO SANIN**

Geólogo

Departamento de Geociencias - Facultad de Ciencias - Universidad Nacional de Colombia

**LUIS ALBERTO BRICEÑO GUARUPE**

Profesor Asociado, Departamento de Geociencias-Facultad de Ciencias-Universidad Nacional de Colombia

---

**Sanín C.E. & L.A. Briceño** (2000): Tomografía geoelectrica: dos ejemplos en la Sabana de Bogotá. Geofís. Colomb. 4:73-78. ISSN 0121-2974. Santa Fe de Bogotá, D.C. - Colombia.

---

### RESUMEN

Con base a las nuevas tecnologías en exploración geoelectrica en cuanto a algoritmos para resolver el problema inverso y software de interpretación, se hicieron dos secciones tomográficas o "imaging". Los dos ejemplos se realizaron, en ubicaciones diferentes y sobre sedimentos no consolidados de edad cuaternaria. El primero, ubicado en cercanías de Tenjo, se realizó para analizar el comportamiento del modelo geoelectrico sobre materiales de baja resistividad y contraste eléctrico (depósitos aluviales de la Formación Sabana); mientras que el segundo, ubicado sobre los depósitos originados por procesos de tipo fluvio-glaciar, como lo son los del Río Tunjuelito, se implementó para ver efectos sobre materiales altamente resistivos y con grandes variaciones laterales de resistividad. Utilizando columnas litológicas, en ambos casos se evaluaron los resultados obtenidos en las secciones, presentándose en general, resultados coherentes y de buena resolución. Las profundidades de investigación alcanzadas fueron de 30%, para el primer ejemplo y 40%, para el segundo, ubicando electrodos con arreglos geométricos de Wenner y de Wenner-Schlumberger, respectivamente. Según los resultados de estos ejemplos, claramente se puede inferir que la profundidad de investigación y la resolución depende claramente del medio, de la geometría y de la longitud de la sección. Se recomienda utilizar esta herramienta geofísica para aplicaciones de poca profundidad (hasta 100 m) y en donde se necesiten datos de alta resolución y confiabilidad.

### ABSTRACT

With the new technologies about math algorithms and software interpretation to solve the inverse problem, two examples of electric tomography were done in two different places and over quaternary deposits that correspond to Sabana de Bogotá. The first, placed, near the location of Tenjo, was done to see the behaviour of the geoelectrical model with low resistivity and electric contrast materials (alluvial deposits of Formación Sabana). While the second, over deposits of fluvial-glacier origin, like Río Tunjuelito's deposits, shows effects over high resistivity materials with great lateral variations of resistivity. The evaluation of the quality of data was made with lithologic columns in both cases, in general, the results were coherent and showed high resolution. The reached depths of investigation were 30% for the first example and 40%, for the second, situating the electrodes with Wenner and Wenner-Schlumberger arrays. Using the results of these two examples, clearly we can see that the depth of investigation depends on the media, the geometric array and the length of the section. This geophysic tool is very useful in shallow applications (100 m depth), and where high resolution and quality are needed.

## 1. INTRODUCCION

La exploración geofísica ha avanzado durante los últimos 20 años, gracias a los progresos en software. Investigadores como **Loke & Barker**, (1995) y **Sasaki**, (1992), han enfocado la solución del problema inverso hacia los modelos 2D y 3D, desplazando a los antiguos modelos unidimensionales en que se basaba la exploración eléctrica de sondeos y perfiles. Este nuevo modelo geoelectrico incluye variaciones laterales y verticales que se acercan más a la realidad.

El presente artículo está basado en el trabajo de grado realizado por **Sanín**, (1999). En donde se utiliza el software de interpretación geoelectrica RES2DINV de la compañía sueca ABEM, desarrollado por **Loke & Barker**, (1995), adaptándolo a la instrumentación convencional de sondeo eléctrico, en dos ejemplos escogidos en la Sabana de Bogotá.

El objetivo es implementar esta tecnología a las posibilidades reales de logística para exploración geofísica con que se cuenta actualmente en Colombia y evaluar los resultados para visualizar las posibles aplicaciones prácticas en ingeniería y geología.

Se escogieron dos sitios, con base en la facilidad de la adquisición de la información, la logística y las condiciones eléctricas del medio.

Dentro de estas condiciones se buscó una zona en donde el medio tuviera bajos valores de resistividad y poco contraste eléctrico. Para este efecto se escogió un área cercana al Municipio de Tenjo, en donde se tenía información litológica de dos pozos y los depósitos aluviales de la Formación Sabana.

El segundo ejemplo se realizó en una cantera de extracción de materiales para construcción. El medio, constituido por gravas y arenas conglomeráticas correspondientes a los depósitos de origen fluvio-glaciar del Cono del Río Tunjuelito, permitía que se dieran las condiciones de altos valores de resistividad y variaciones laterales del espesor de los depósitos de grava, que se intercalan con materiales finos.

### 1.1. Concepto de Tomografía

La tomografía tiene sus raíces en "tomo" que viene del latín: *tomus*, que significa sección, y "grafía", que viene del griego y significa relativo a escritura. Un concepto general de tomografía en ciencia sería: representación de una propiedad, magnitud o campo físico en un corte o sección.

La tomografía geofísica se plantea como un problema inverso que tiene el mismo principio de la tomografía acústica.

Generalmente se plantea la tomografía como herramienta para obtener información de la distribución horizontal y vertical de parámetros en el subsuelo.

En geofísica se conocen la tomografía sísmica y la tomografía eléctrica, dentro de esta última se conocen la "Tomografía de impedancia" (EIT) y la "Tomografía de resistividad" (ERT), dentro de la que se desarrolló este trabajo.

### 1.2. Problema inverso

Como en todo problema inverso se tiene un modelo, unos parámetros que definen dicho modelo y los datos de campo. Los parámetros del modelo están definidos por la resistividad aparente en cada uno de los bloques de que se compone el modelo.

Para un ensayo físico dado, donde se tomen  $N$  mediciones, para un modelo físico en el que se tengan  $M$  parámetros, se tendrán los vectores respectivos:

$$\mathbf{d} = (T_1, T_2, T_3, \dots, T_N)^T$$

En donde  $T$  significa transpuesta. Los valores  $d$  son los datos que obtenemos del experimento y los valores de  $m$  son los parámetros del modelo que vamos a encontrar. Dependiendo del tipo de problema y de la forma que se plantee la resolución de éste, habrán más o menos números de parámetros y de mediciones. Generalmente se plantean ecuaciones matriciales que se resuelven mediante operaciones de transpuestas e inversas para obtener la matriz de parámetros:

$$\mathbf{G} \mathbf{m} = \mathbf{d}$$

### 1.3. Modelo planteado para resolver el problema inverso de la tomografía

**Loke & Barker** (1995) explican las ecuaciones que rigen el problema directo para el modelo rectangular ya antes utilizado por otros autores (**De Groot-Hedlin & Constable**, 1990).

El modelo rectangular (Fig.1) consiste en dividir el subsuelo en varios rectángulos de determinadas dimensiones, cada uno de los rectángulos contiene un parámetro (resistividad aparente y real) que es el que se utilizará posteriormente en la inversión para la obtención de la tomografía final.

Para el manejo de ecuaciones en donde se obtienen los parámetros mediante mínimos cuadrados y matrices jacobianas (derivadas parciales) se necesita conocer con claridad las derivadas parciales del potencial en cada uno de los bloques imaginarios que contienen los parámetros del modelo. Para cada bloque rectangular se supone un medio homogéneo en el que se puede aplicar fácilmente la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \phi = \rho I_s \delta(x_s)$$

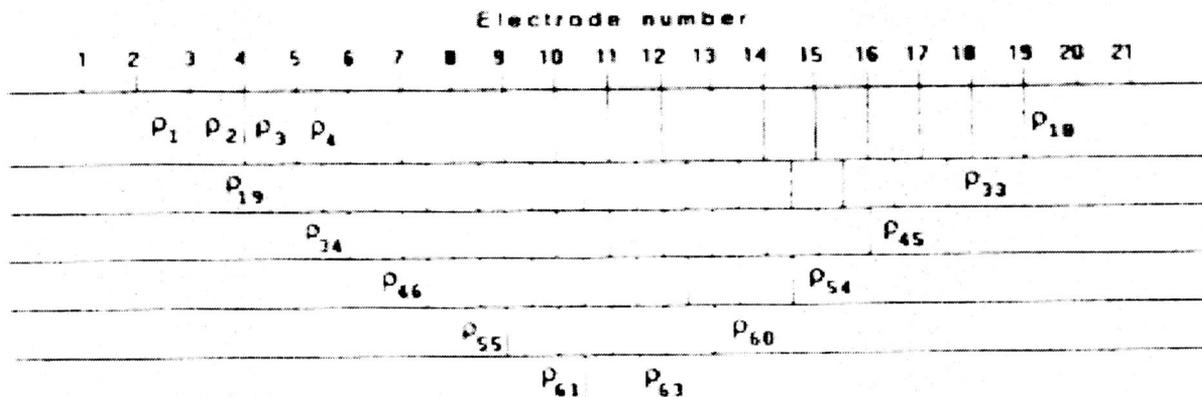


FIGURA 1. MODELO RECTANGULAR DEL SUBSUELO

En donde  $\phi$  es el potencial producido por una fuente puntual de corriente en un medio homogéneo (que en este caso es el bloque rectangular del modelo) que transmite una corriente continua  $I_s$ , localizada a una distancia  $x_s$ , según Park & Van (1991).

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

La ecuación principal para el cálculo de matrices jacobianas que utilizan Loke & Barker (1995), y en la que se basa el software RES2DINV es conocida como: "Smoothness-constrained, least-squares inversion", (De Groot-Hedlin & Constable, 1990).

En donde  $J$  es la matriz jacobiana, con las derivadas parciales correspondientes a los bloques rectangulares del modelo,  $\lambda$  es un factor denominado multiplicador de Lagrange (Factor de amortiguamiento o Damping factor),  $g$  es el vector de discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre las resistividades aparentes medidas y calculadas, y  $p$  es el vector de corrección de los parámetros del modelo. La matriz  $C$  tiene un efecto de filtrado 2D que suaviza los parámetros del modelo hacia un valor constante "smoothness constrain" (Sasaki, 1992).

#### 1.4. Proceso de inversión

La inversión utilizada en el trabajo de Loke & Barker (1995) se basa en los mismos conceptos de Sasaki (1992), pero modifica los procesos de inversión con el fin de ahorrar pasos en el computador. Con esta inversión Loke diseña el programa para Windows que se utiliza en este trabajo (RES2DINV). La inversión utiliza como base a la ecuación de mínimos cuadrados y consiste en tres pasos principales para la práctica:

1. El cálculo de los valores de resistividades aparentes iniciales ( $q_0$ ) para el cálculo de las inversiones

posteriores. Esta resistividad aparente inicial se calcula mediante el promedio logarítmico de los valores que se miden en superficie utilizando la siguiente ecuación:

$$q_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i$$

2. La matriz Jacobiana se calcula para la configuración (arreglo geométrico), junto con los valores de derivadas parciales, en un archivo que tiene el programa de interpretación.
3. Con los valores de la matriz jacobiana se resuelve la ecuación de mínimos cuadrados y se obtiene el vector de corrección de parámetros " $p$ ", de donde se obtienen un  $q_1$ , mediante:

$$q_1 = q_0 + p$$

En donde este  $q_1$  corresponde a los nuevos parámetros calculados para el modelo, mientras que los  $q_0$  son los parámetros iniciales.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Adquisición de datos

En la tomografía geoelectrica se pueden implementar arreglos geométricos como el Schlumberguer, Wenner, Wenner-Schlumberguer, polo-dipolo y dipolo-dipolo.

La adquisición se hace sobre una línea en la que hay una serie de estaciones de datos, como se muestra en la Fig.2.

Para cada arreglo se debe diseñar una grilla (Fig.3) para visualizar la secuencia de toma de datos, ya sea que se cuente con una unidad de geoelectrica continua o una convencional de toma de dato por dato.

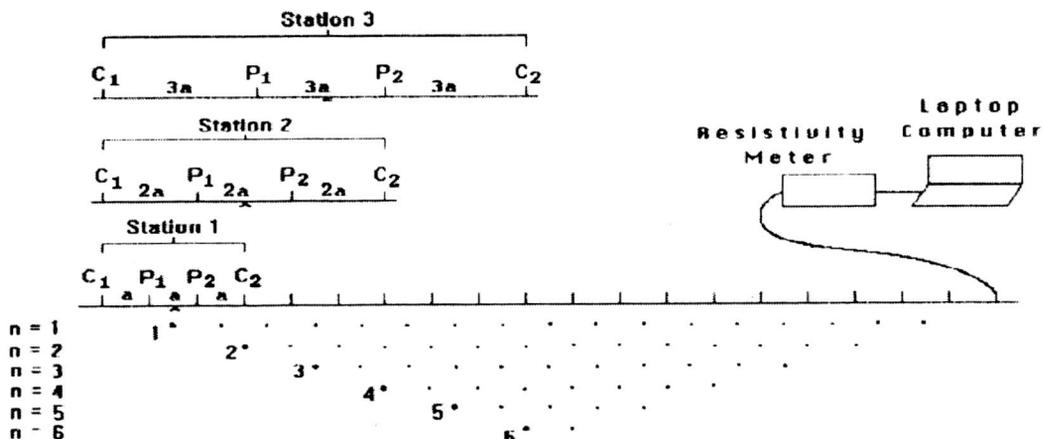


FIGURA2. DIAGRAMA DE GRILLA DE TOMA DE DATOS Y NIVELES DE INFORMACION

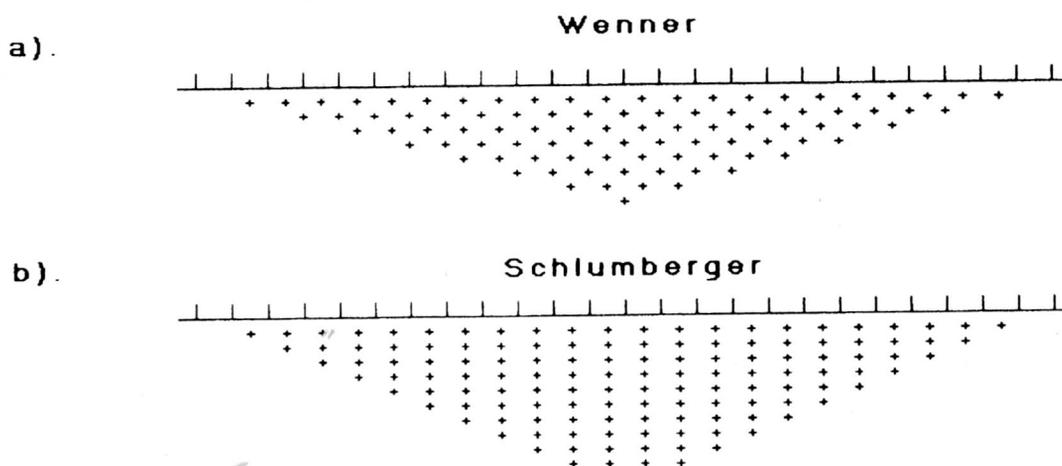


FIGURA 3. ARREGLOS DE WENNER Y SCHLUMBERGUER

## 2.2. Procesamiento de datos

Mediante el software de interpretación RES2DINV se leyeron los datos de los dos ejemplos, utilizando opciones gráficas de optimización de los datos que trae, como opciones de lectura, el programa. Se pueden editar también opciones de los pasos inversión, tales como el factor de amortiguamiento, filtro de suavizado, espesor de los niveles de bloques del modelo y la optimización del factor de amortiguamiento.

El programa realiza las inversiones con los pasos previamente mencionados y genera una gráfica en colores después de realizar tres iteraciones. Se limpia el ruido con el descarte de datos anómalos y cambiando los valores del factor de amortiguamiento. El proceso se realiza hasta obtener la sección más adecuada para la interpretación.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Ejemplo 1: Zona de Tenjo

Esta tomografía se realizó dentro de los predios de una propiedad privada, de la Vereda Guangata, Municipio de Tenjo, sobre depósitos aluviales de edad cuaternaria correspondientes a la Formación Sabana.

El arreglo utilizado fue de Wenner, para una sección de 126 m, con 42 puntos de electrodos de corriente, unidad de espaciamiento entre electrodos de 3 m, con 15 niveles de datos para el modelo, para un total de 112 datos y 93 bloques.

El modelo litológico final obtenido, junto con la columna de pozo, se muestran en la Fig.4:

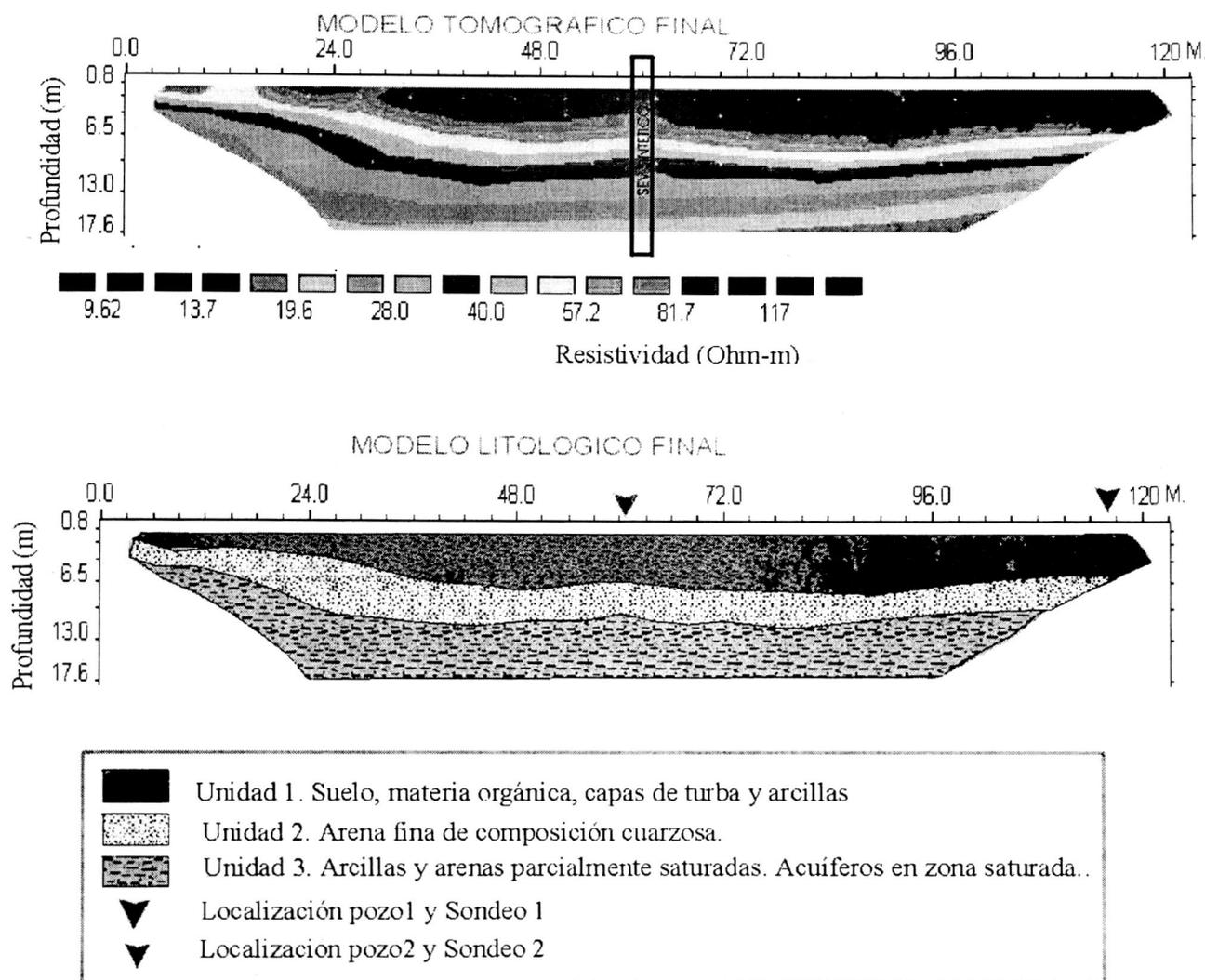


FIGURA 4. SECCION TOMOGRAFICA Y MODELO LITOLOGICO DEL EJEMPLO DE TENJO

Se interpretaron tres unidades que se pueden distinguir mediante la geoelectrónica: una unidad superficial de alta resistividad (80-120 Ohm-m) que está conformada por suelo, materia orgánica, capas de turba y arcilla, una unidad de resistividad más baja que la anterior consistente en una arena de grano fino de composición cuarzosa, y una capa más profunda, que llega hasta los 18 m aproximadamente, y que define la base de la sección tomográfica, de baja resistividad y constituida por arcillas.

La profundidad de investigación ( $\approx 18$  m), alcanzada en esta sección, se debe al arreglo utilizado y a que se presentan unidades de baja resistividad que impiden la profundización de la corriente. En este caso la profundidad de investigación fue, aproximadamente, un 30% de la distancia AB/2.

## 2.2. Ejemplo 2: Zona de Tunjuelito

Se ubicó al sur de Bogotá en una cantera de explotación de gravas, sobre depósitos no consolidados de edad cuaternaria y origen fluvio-glaciar correspondientes al Cono del Río Tunjuelito.

El arreglo utilizado fue Wenner-Schlumberger, con una longitud total de 160 m, espaciamiento entre electrodos de 5 m, 32 puntos de electrodos, 10 niveles de datos, un total de 120 datos y 93 bloques para el modelo.

En la Fig.5, se aprecia el modelo obtenido y la columna litológica utilizada para evaluar la sección.

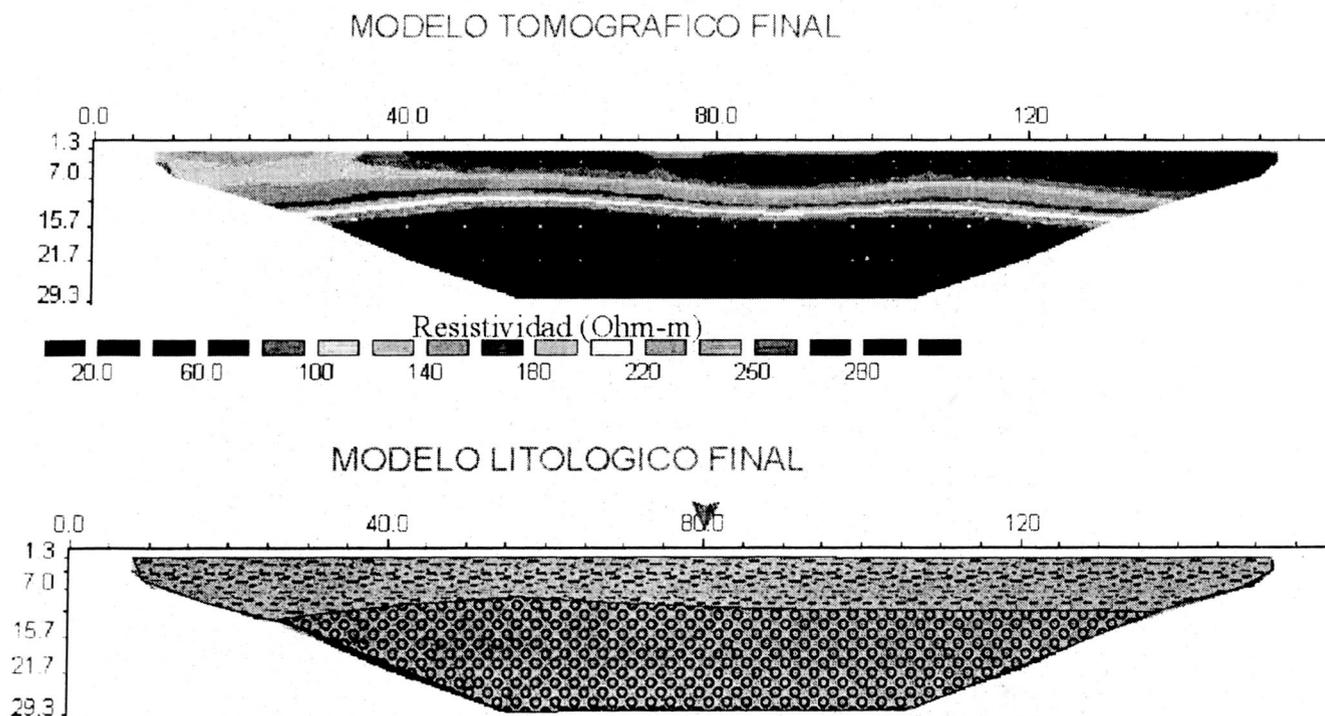


FIGURA 5. SECCION TOMOGRAFICA FINAL Y MODELO LITOLOGICO. ZONA DEL CONO DEL RIO TUNJUELITO

Se interpretaron dos unidades: una más superficial de bajas resistividades, que se compone principalmente de suelo, materia orgánica e intercalaciones de arcillas y limos (20-100 Ohm-m), y otra capa más profunda, cuyo tope se encuentra en este modelo hacia los 16 m aproximadamente, con valores de resistividad altos (200-300 Ohm-m), que corresponden a los conglomerados del Cono del Río Tunjuelito.

### CONCLUSIONES

Se obtuvieron secciones tomográficas, que comparadas con los sondeos eléctricos verticales, mostraron una mejor resolución y valores similares de resistividades eléctricas con una metodología que podría ser competitiva, tanto logística como económicamente, con los otros métodos que se hacen en el país con el estado actual de instrumentación geoelectrica.

Por medio de los resultados obtenidos en ambas tomografías se ve que la profundidad de investigación de la tomografía geoelectrica depende de la composición de los materiales sobre los que se va a trabajar y del arreglo geométrico utilizado.

Se vio que los datos obtenidos coinciden en gran parte con lo observado en la información disponible, sin

embargo, se encontró la limitación que tiene la exploración geoelectrica, que es la pérdida de resolución, aunque menor que en el SEV, con la profundidad.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Degroot-Hedlin, C. & S. Constable.** 1990: Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, Vol 55:1613-1624.
- Loke, M. & R.D. Barker.** 1995: Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, Vol 60:1682-1690.
- Parke, S.K. & G.P. Van.** 1991: Inversion of pole-pole data for 3D resistivity structure beneath array of electrodes. *Geophysics* 50:951-960.
- Sanin, C.E.** 1999: Tomografía Geoelectrica: Adaptación y aplicación en dos ejemplos de la Sabana de Bogotá. (Trabajo de Grado) 90pp. Universidad Nacional de Colombia.
- Sasaki, Y.** 1992: Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, *Geophysical Prospecting*. 40:453-463.