

## Ensayos

# Aplicaciones de la tomografía geoelectrica 2-d

## al estudio del subsuelo

### Resumen

Se describe en este trabajo la metodología empleada para realizar levantamientos geofísicos de resistividad, aplicados a estudios del subsuelo enfatizando el hecho de que son métodos totalmente indirectos. El objetivo fundamental de tales estudios es el de medir contrastes de resistividad entre estructuras u objetos de interés con las rocas circundantes.

Se analiza la importancia del estudio de la resistividad eléctrica de los suelos y se enumeran los factores más importantes que determinan sus valores para diversos materiales geológicos.

En lo referente al método de resistividad, se describe a detalle el principio fundamental que gobierna su empleo en la práctica para estudios del subsuelo. En términos generales en este trabajo se le ha dado prioridad al arreglo electrodico Wenner que es el más utilizado dado su alto poder de resolución.

En los estudios realizados en campo por el Instituto de Minería de la U.T.M. se emplea ampliamente la técnica de perfiles, secciones o calicatas, motivo por el cual se detalla su principio práctico.

Dado que la técnica de tomografía geoelectrica es de reciente creación, se hace una breve introducción a los conceptos de "problema directo" y "problema inverso" que son comunes a otras áreas del conocimiento, como son la tomografía médica o el procesamiento de imágenes. Se estudia brevemente la técnica empleada en la inversión de los datos en campo, describiendo además de manera sencilla el método de mínimos cuadrados y la naturaleza del problema de la tomografía geoelectrica.

Se presentan los resultados de un estudio geotécnico realizado para evaluar la factibilidad de construir viviendas en un suelo sumamente fracturado. La tomografía del subsuelo determina a partir de los valores de resistividad el tipo de rocas del cual está for-

### Abstract

This study describes the methodology used to do geophysical sampling of resistivity applied to studies of subsoil, with emphasis on the fact that they are totally indirect methods. The fundamental objective of such studies is to measure resistivity contrasts between structures and objects of interest within the surrounding rocks.

The importance of studying the electrical resistivity of soils is analysed, and the most important factors which determine values for different geological materials are enumerated.

As regards the method of resistivity, the fundamental principle which governs its practical use in studies of subsoils is described in detail. Generally speaking, priority is given to the Wenner electrode arrangement which is used most because of its high power resolution.

Field studies carried out by the Mining Institute of the Technological University of the Mixteca (U.T.M.) widely use the profiles, sections or boring technique; for this very reason its practical principle is related in detail.

Because the geoelectrical tomography technique is a recent creation, a brief introduction is given to the concepts of "direct problem" and "inverse problem", which are also found in other fields of knowledge such as medical tomography or image processing. There is a brief study of the technique used in the inversion of the field data, giving a simple description of the minimal squares method and the nature of the geoelectrical tomography problem.

Results are presented of a geotechnical study done to evaluate the feasibility of building houses on a highly cracked soil. Based on resistivity values, subsoil tomography determines the type of rocks from which it is formed, and it shows that the approximate percentages of fresh water saturation are very high. Based on this evidence, it is possible to recommend preventive measures which help

### Abstrait

Dans ce travail on décrit la méthode employée pour réaliser la levée de résistance géophysique appliquée aux études du sous-sol en mettant en valeur le fait que se sont des méthodes totalement indirectes.

L'objectif fondamental de telles études est de mesurer les contrastes de résistances entre les structures ou objets d'intérêts avec les roches avoisinantes.

On analyse l'importance de l'étude de la résistance électrique des sols et on énumère les facteurs les plus importants qui déterminent ses valeurs pour divers matériaux géologiques.

En référence à la méthode de résistance, on décrit en détail le principe fondamental qui gouverne son emploi dans la pratique pour les études du sous-sol.

En termes généraux, la priorité a été donnée à l'arrangement électrique Wenner, qui est le plus utilisé donnant son haut pouvoir de résolution.

Dans les études réalisées en campagne par l'institut d'exploitation des mines de la U.T.M, la technique des profils est amplement employée, sections ou qualitatives, motif par lequel se détaille son principe pratique.

Étant donné que la technique géoelectrique tomographique est de création récente, une brève introduction des concepts de « problèmes directs » et « problème inverse », sont communs aux autres aires connues comme la tomographie médicale ou le processus des images.

On étudie brièvement la technique employée dans l'inversion des données en campagne décrivant de façon plus simple la méthode des minimales carrés et la nature du problème de la topographie géo-électrique.

Les résultats se présentent dans une étude géotechnique réalisée pour réaliser la perspective de construction de logements dans un sous-sol fortement détérioré.

La tomographie du sous-sol détermine à partir des valeurs de résistances le type de

mado, y demuestra que los porcentajes aproximados de saturación por agua dulce son muy elevados. A partir de estas evidencias es posible recomendar medidas preventivas que ayuden en la toma de decisiones sobre la posibilidad de construir o no.

Es posible considerar entonces que la tomografía geoeléctrica posee un elevado potencial como herramienta de estudio y exploración del subsuelo.

in making decisions regarding the possibility of building or not.

Hence, it is possible to consider geoelectrical tomography as a high potential tool for studying and exploiting subsoils.

roche par laquelle elle est formée et démontre que les pourcentages approximatifs de saturation par eau douce sont très élevés.

A partir de ces évidences, il est possible de recommander des mesures préventives qui aident à prendre des décisions sur la possibilité de construire ou no.

Il est alors possible de considérer que la tomographie géo-électrique possède un potentiel élevé comme outil d'étude et d'exploration du sous-sol.

\* Javier S. Salgado Pareja,  
Enrique Contreras González,  
Miguel de la O Vizcarra.

## 1. Introducción

Los métodos geofísicos de exploración, entre los que podemos mencionar el eléctrico de resistividad, miden una serie de propiedades físicas de objetos o estructuras en el subsuelo desde la superficie del terreno que las diferencian, del medio que las rodea.

La explotación de estos contrastes entre las propiedades de diversos materiales y las rocas encajonantes es común en la exploración de recursos naturales (petróleo, aguas subterráneas, minerales, etc.). También se realizan prospecciones de soporte a la Ingeniería civil, como el estudio de las condiciones de cimentación de presas o edificios, o el nivel de saturación de los suelos. La finalidad de una prospección geoeléctrica es finalmente la de conocer las dimensiones y profundidad de estructuras o cuerpos en el subsuelo a partir de los valores de resistividad obtenidos en campo mediante diversas técnicas y arreglos geométricos de electrodos. Los datos geoeléctricos tratados de manera adecuada con métodos modernos, y haciendo uso de valiosas herramientas matemáticas y computacionales, nos proporcionan una imagen o cartografía de la resistividad real del subsuelo.

En este trabajo se describe de manera general la metodología empleada para la obtención de imágenes geofísicas del subsuelo presentándose además, los resultados de un estudio geotécnico efectuado por el Instituto de Minería de la U.T.M.

## 2. Resistividad eléctrica de suelos

La resistividad eléctrica  $r$  de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad  $s$  como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

Si se considera un conductor rectilíneo y homogéneo de sección y longitud, la resistencia eléctrica es:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1)$$

de aquí obtenemos la resistividad

\* Profesores Investigadores de la  
Universidad Tecnológica de la Mixteca

$$\rho = \frac{Rs}{l} \quad (2)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro (Wm).

La conductividad se define como el inverso de la resistividad siendo su unidad en el Sistema Internacional el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Un estudio notable de la resistividad eléctrica en diversos materiales, entre ellos los geológicos, fue publicado por Orellana en 1982, y se recomienda al lector interesado consultar dicha referencia.

### 3. Método geofísico de resistividad

La Figura 1 muestra el principio fundamental de la medida de resistividad del suelo. Este consiste en inyectar una corriente continua entre el par de electrodos AB midiéndose la tensión entre el par de electrodos MN. Para un medio homogéneo de resistividad, la diferencia de potencial es (Orellana, 1982)

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (3)$$

Donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

donde

$$g = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (5)$$

es un factor geométrico que depende únicamente del arreglo de los electrodos.

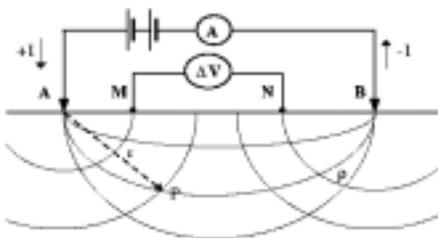


FIG. 1. DISPOSITIVO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

### 4. Arreglos electródicos básicos

En cualquier arreglo electródico, si se conoce el factor geométrico, la corriente eléctrica inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, es posible determinar la resistividad aparente mediante la fórmula  $\rho = g \frac{\Delta V}{I}$  donde  $g$  es el factor geométrico definido en la ecuación 5. En este trabajo se ha aplicado el arreglo o dispositivo que se ilustra *Wenner* en la Figura 2 en su modalidad de Calicatas o perfiles.

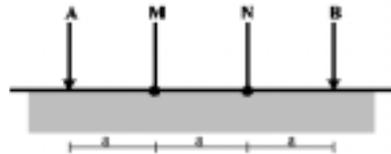


FIGURA 2. DISPOSITIVO WENNER

La finalidad de las calicatas eléctricas (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijando una profundidad de investigación máxima. Esto lo hace idóneo para la ubicación de contactos verticales, tales como fallas, fracturas, etc., o bien cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad. Orellana (1982) resalta que la zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad aproximadamente constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos. La *Calicata Wenner* consiste en desplazar los cuatro electrodos AMNB a la vez manteniendo sus separaciones interelectródicas a lo largo de un recorrido (Figura 3), en esta figura se representa la distancia del origen, O, al centro de los electrodos MN en abscisas y en ordenadas el valor de  $\rho_a$  ( $\Omega m$ ) para cada distancia  $x$ .

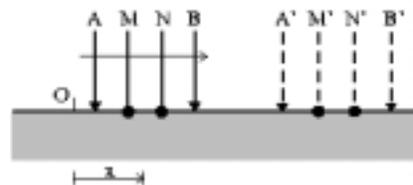


FIG. 3. CALICATA WENNER. LOS CUATRO ELECTRODOS SE DESPLAZAN A LA VEZ SIENDO SU SEPARACIÓN CONSTANTE.

## 5. Tomografía eléctrica

Se ha establecido anteriormente que la medición de la resistividad aparente en la superficie mediante diversos arreglos de electrodos permite esclarecer la naturaleza de diversas estructuras. Sin embargo esta tarea formidable no es tan simple como pudiera parecer, ya que se trata de medir aquello con lo que no se está en contacto.

La metodología empleada en geofísica para lograr deducir mediante métodos indirectos la naturaleza de nuestro entorno esta orientada a resolver dos problemas:

1. El problema directo, y
2. El problema inverso

El problema directo obtiene el potencial en la superficie (y, por tanto, la propiedad buscada) cuando se conoce la distribución de por ejemplo, densidad o resistividad del subsuelo.

Este consiste fundamentalmente en obtener soluciones analíticas exactas y aproximadas en la superficie cuando se consideran cuerpos de formas diversas como pueden ser cilindros, esferas sólidas o huecas, en otras palabras se obtiene el efecto que ejercería tal o cual cuerpo de forma, dimensiones y propiedades específicas sobre un sensor instalado sobre la superficie del terreno.

Estas soluciones permiten en el caso eléctrico poder determinar que tipo de arreglo eléctrico es el más adecuado para poder detectar una falla vertical, o bien una cavidad hueca.

El problema inverso se define, por otro lado, como la metodología empleada para extraer información útil de nuestro medio físico empleando datos en forma numérica de alguna propiedad de este entorno. Estas propiedades también se referirán como método específico (normalmente una teoría matemática o *modelo*) que relaciona los *parámetros* con los *datos*. El problema inverso contrasta con el problema directo, donde se predicen los *datos* a partir de los *parámetros* y de un *modelo*. Normalmente el problema inverso es más difícil de resolver que su correspondiente problema directo.

Este problema aparece en muchas otras ramas de las ciencias físicas, como pueden ser la tomografía médica, el procesamiento de imágenes o el ajuste de curvas. En nuestro caso será la resistividad o conductivi-

dad del suelo la información a extraer, y los datos serán las tensiones medidas en la superficie y el *modelo o estructura* queda aún por determinar.

El problema inverso obtiene la distribución de conductividades del subsuelo a partir de las medidas realizadas en la superficie. La no-linealidad del problema inverso original se resuelve normalmente mediante el uso de métodos iterativos. Estos métodos obtienen para cada iteración el modelo (la matriz de sensibilidad o Jacobiana) y los datos, usando algún método numérico (elementos finitos, diferencias finitas).

La técnica empleada para la **inversión** de los datos obtenidos en campo por el Instituto de Minería consiste en una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basada en una optimización quasi-newtoniana (deGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992, Loke and Barker 1996). Esta técnica es aproximadamente 10 veces más rápida que el método convencional de mínimos cuadrados para grandes cantidades de datos y requiere menos memoria de computadora. Todo este procedimiento está basado en la siguiente ecuación:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (6)$$

donde

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

$f_x$  = filtro horizontal,

$f_z$  = filtro vertical,

$J$  = matriz de derivadas parciales,

$u$  = factor de amortiguamiento,

$d$  = es el vector de perturbación del modelo y finalmente  $g$  es el vector de discrepancia.

El problema de la tomografía geoelectrica consiste en la obtención de imágenes de la distribución de conductividades en el subsuelo. Para ello éste se divide en celdas (Figura 4). En el caso 2-D que es el que nos ocupa, se discretiza la sección transversal a la superficie que se localiza debajo del arreglo de electrodos en celdas cúbicas o bloques. El objetivo concreto es obtener la resistividad de cada bloque rectangular que producirá una sección de resistividades en la superficie que no discrepe en el sentido de los mínimos cuadrados con los datos obtenidos en campo.

En este trabajo se empleó el arreglo *Wenner*, para el cual el espesor de la primera capa de bloques o pa-

raleyedados se fija a 0.5 veces la separación de los electrodos. El sistema SARIS empleado utiliza el sistema inteligente de cable ICS-10, siendo entonces la separación inter-electródica de 10 metros y el espesor de la primera capa de 5 m.

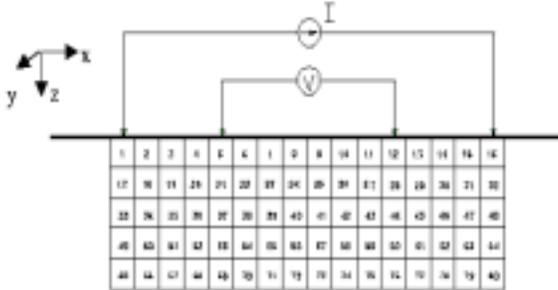


FIGURA 4. DISCRETIZACIÓN 2D DEL SUBSUELO

El modelado del subsuelo en 2D tiene la ventaja respecto al 3D de reducir el número de celdas, y consecuentemente el tiempo de cálculo de las conductividades. Sin embargo un modelado 3D proporciona imágenes más realistas de la distribución espacial de conductividad.

Si el modelo escogido (discretización del subsuelo) no es adecuado, las imágenes pueden ser irreales, apareciendo, por ejemplo, conductividades negativas. Si el número de celdas es muy superior al número de medidas, el problema se sobredetermina, lo que hace difícil encontrar una solución adecuada. Esto se soluciona reduciendo el número de celdas, y añadiendo además información a priori (utilizando los métodos de retroproyección) o aumentando el número de medidas ya sean reales o interpoladas, (Salgado 1988). Los errores en las medidas afectan la localización de los objetos más profundos.

## 6. Estudios reales en campo

El Instituto de Minería de la U.T.M. ha realizado a partir de la adquisición de un equipo automático de resistividad (SARIS), una serie de estudios orientados tanto a la evaluación geotécnica de suelos como a la búsqueda de agua.

Con el fin de emitir un dictamen técnico respecto a la factibilidad de construir una unidad habitacional para los trabajadores de la SARH en el predio conocido como La Estancia, Huajuapán de León, Oaxaca, se realizó un levantamiento geofísico de resistividad.

El estudio geofísico consistió en obtener secciones geoelectricas con el fin de obtener una imagen espacial de la distribución de resistividad eléctrica con la profundidad. Este parámetro físico como se dijo antes, está determinado por factores tales como la naturaleza de las rocas, el contenido de fluidos, y el porcentaje de minerales disueltos en los mismos. En consecuencia, a partir de sus valores es posible deducir parámetros importantes que permiten entender la naturaleza del subsuelo sobre el cual se pretende construir.

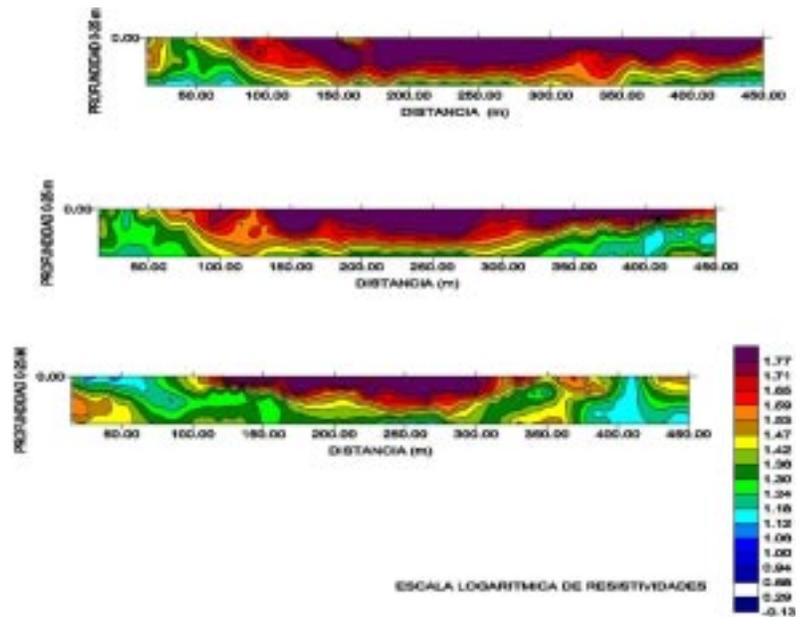


FIGURA 5. SECCIONES GEOELECTRICAS EN LA "ESTANCIA"

## 7. Interpretación de resultados

La Figura 5 muestra tres imágenes geofísicas del subsuelo para el predio La Estancia. Es posible apreciar el gran poder resolutorio de la tomografía geoelectrica hasta una profundidad máxima de exploración de 25 m tanto en resistividad como en espesor de las capas del subsuelo. Dependiendo de la localización de las secciones, el proceso de inversión de los datos arrojó resistividades en el rango de 1 a 60.

De acuerdo a resultados experimentales, valores de resistividad comprendidos en este rango, corresponden a materiales tales como arcillas, gravas y arenas saturadas de agua dulce.

La información geológica disponible establece que las rocas que afloran en este predio son muy permea-

bles dado su alto grado de fracturamiento (J. Guerrero, comunicación escrita, 2001). Se puede inferir en consecuencia que las capas del subsuelo hasta una profundidad de 25 metros se encuentran formadas por material sedimentario, constituido en su mayor parte por areniscas, arcillas y conglomerados, con la peculiaridad de ser altamente permeables, y por ende fácilmente saturables por agua. Un alto grado de saturación por agua modifica de manera importante las propiedades mecánicas de las rocas, alterando algunos de sus principales módulos elásticos. Una roca con una saturación aproximada del 80% falla fácilmente ante cargas mecánicas como aquellas impuestas por construcciones. Este fenómeno debe de tomarse en cuenta antes de planificar cualquier obra civil.

Aunado a lo anterior, la región de Huajuapán de León es eminentemente sísmica, y debe de considerarse que materiales con las características antes mencionadas, fácilmente pueden dar origen al fenómeno de licuefacción (desintegración del suelo en dos fases: sólida y líquida) ante el paso de las ondas sísmicas, sobre todo las de corte o cizalla, también conocidas como "S". En la ciudad de México en el sismo de 1985, este fenómeno fue el responsable del colapso de un gran número de edificios y este hecho no se puede ignorar.

La tomografía geoelectrica permite entonces fácilmente esclarecer la naturaleza del subsuelo para cualquier tipo de terreno. Para el caso de La Estancia se concluye que algunos sectores del predio pueden alcanzar grados de saturación por agua sumamente elevados. Para este tipo de terrenos se recomienda evitar construir cualquier tipo de obras civiles.

## 8. Conclusiones

Las bases teóricas y prácticas de la tomografía geoelectrica se han presentado brevemente, enfatizando que su puesta en práctica no es difícil dadas las herramientas actuales disponibles tanto en software como en hardware.

Se ha demostrado además mediante trabajo de campo para un predio específico, que la tomografía geoelectrica 2-D es una herramienta útil y poderosa para la investigación de áreas con una geología subterránea compleja, donde además otros métodos directos o indirectos no proporcionan resultados válidos o al menos creíbles.

El espectro de aplicaciones de esta tecnología está siendo explorado en el Instituto de Minería de la U.T.M. Entre algunas de las que se contemplan están el estudio de problemas ambientales, exploración de agua subterránea y búsqueda de recursos minerales en diferentes ambientes geológicos de la región Mixteca 

## Referencias

- DEGROOT-HEDLIN; CONSTABLE, S.  
1990 Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12): 1613-1624.
- LOKE, M.H.; BARKER, R.D.  
1996 Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- ORELLANA, E.  
1982 *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. 2ª ed. Madrid: Paraninfo. Vol. 1.
- SALGADO, J.  
1988 Geoelectrical resistivity structure at Kirishima volcano and its geothermal significance. M.Sc. Thesis, Faculty of Science, The University of Tokyo, Japan. pp 283.
- SASAKI, Y.  
1992 Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40: 453-463.