

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Caracterización espacial de la variable resistividad eléctrica en el municipio de Envigado, Colombia

Alarcón, J. E., Martínez-Carvajal, H.

Department of Civil & Environmental Engineering – University of Brasilia, Brasilia, D.F, Brazil



RESUMEN

Con el objetivo de establecer métodos y modelos que permitan caracterizar geoeléctricamente un volumen determinado de suelo o roca se hizo un análisis espacial de la variable Resistividad Eléctrica (ρ) en los materiales componentes de los 10 primeros metros del subsuelo del municipio de Envigado (Antioquia – Colombia). Para esto se realizó un exhaustivo trabajo de campo consistente en 200 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y calicatas distribuidos de manera aleatoria sobre la parte central del municipio cubriendo un área de aproximadamente 28 km². Posteriormente se hizo un trabajo estadístico sobre los datos tomados con el objetivo generar un modelo continuo para la región de estudio. Los resultados del trabajo mostraron la naturaleza espacial muy marcada de la variable en cuestión y las bondades de las herramientas de espacialización para la caracterización y la generación de información continua de la variable resistividad. El análisis final se hizo del tipo 3D con el que luego se construyeron mapas confiables para unas profundidades de 2.5, 5 y 10 m, los cuales sirven como insumo para aplicaciones de geología de ingeniería e inclusive para estudios avanzados de corrosión de instalaciones de puestas a tierra.

ABSTRACT

This paper aims to establish methods and models that allow the geoelectrical characterization of a certain volume of soil or rock with the use of geostatistical tools for developing a spatial analysis of the variable Electric Resistivity (ρ) on the surficial part of the soil profile (10 m depth). The work area is located at the municipality of Envigado (Colombia), where an exhaustive “in situ” testing campaign was carried out, composed by 200 Vertical Electric Soundings (VES) and Electrical Continuous Profiles. The geographical distribution of the test points was randomly chosen. Subsequently, it was generated a continuous model for the resistivity on the investigated region, observing a strong spatial nature of this variable. The advantages of spatialization tools for the characterization and generation of continuous information of this variable are showed in this work. The final 3D analysis was used to generate a series of maps showing the spatial distribution of the resistivity at 2.5, 5 and 10 m depth. These maps are being used for geology engineering purposes and for advanced research on the relationship between in situ soil resistivity and corrosion processes of buried structures.

1 INTRODUCCIÓN

Son pocos los estudios geofísicos realizados en los alrededores de la ciudad de Medellín debido, principalmente, a la poca experiencia local en la interpretación de los datos generados. En la región plana central del valle en el cual se localiza la ciudad se han realizado algunos trabajos de exploración geoeléctrica con el propósito de hacer exploración de agua subterránea, no obstante, las aplicaciones en las zonas de montaña no han sido bien recibidas por la dificultad inherente a las variaciones topográficas y a la irregularidad geométrica de los contactos o interfaces de los perfiles de meteorización. Adicionalmente, las características geológicas del terreno, conformado principalmente por suelos residuales de rocas metamórficas y depósitos de vertiente, hace que la respuesta eléctrica del terreno tenga variaciones horizontales considerables, aún dentro de distancias pequeñas. Recientemente, algunas empresas del sector eléctrico y grupos de investigación en geofísica aplicada, han mostrado interés en la implementación de técnicas de interpretación que permitan utilizar extensivamente las técnicas geoeléctricas para diferentes aplicaciones de geotecnia, hidrogeología, ingeniería eléctrica, infraestructura enterrada entre otras. De esta manera se

comenzó, en conjunto con el grupo de investigaciones GIMEL de la Universidad de Antioquia y con el Instituto de Estudios de Infraestructura de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, un trabajo de recopilación de la información geoeléctrica de la ciudad y sus municipios vecinos. Se escogió, por razones de logística principalmente, al municipio de Envigado para realizar un primer estudio extensivo de mediciones de resistividad para ensayar técnicas de geoestadística en la interpretación de los datos y presentación de los mismos.

Este trabajo muestra los principales detalles de la exploración geoeléctrica mencionada, el tipo de procesamiento realizado y los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos sirven de soporte para proyectos de puesta a tierra de sistemas de transmisión de energía eléctrica y podrían servir de insumo básico para investigaciones futuras sobre correlaciones con propiedades geotécnicas o hidrogeológicas.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE TRABAJO

El Municipio de Envigado, está localizado en el Departamento de Antioquia, al sur del Valle de Aburrá. Limita al norte con Medellín, la capital del departamento, tal como se muestra en la Figura 1.

El área de estudio engloba toda el área urbana del municipio cubierta por las líneas de alta tensión de Empresas Públicas de Medellín (EPM), empresa encargada de la distribución de energía en este municipio.

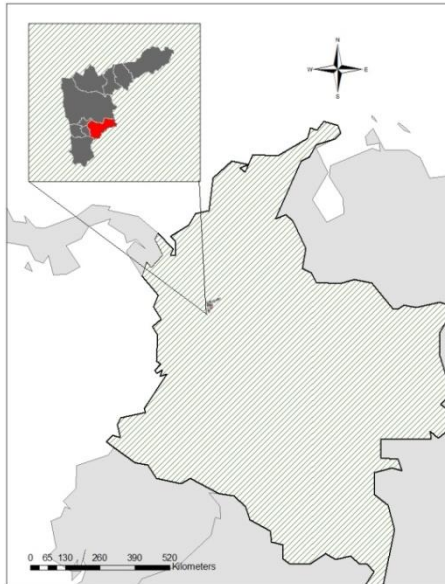


Figura 1. Localización del área de trabajo.

2.1 Geología

En términos generales, la geología de la región de estudio está compuesta por depósitos aluviales (Qat y Qal) y de vertiente (Qfe) muy heterogéneos, sobre rocas

metamórficas anfibólicas (Pam), esquistosas (Pes) y gneissicas (Pnm) o sobre los suelos producto de su meteorización. Puede encontrarse en algunos sitios de en la parte alta de las laderas, afloramientos de estos grupos de roca o de sus suelos residuales que suelen presentar espesores de hasta 25m. En la parte baja de la ladera se concentran los depósitos aluviales asociados al Río Medellín (Qal) (ver figura 2).

2.2 Hidrología e Hidrogeología

El Municipio de Envigado tiene una precipitación promedio anual de 2.000 mm, la cual varía de 1.300 mm en la parte noroccidental hasta 2.500 mm en la parte oriental. La temperatura promedio varía desde 22 °C en cercanías de la cabecera municipal hasta 18 °C en la parte alta. Se registra en la zona una humedad relativa media del 70% (Instituto del Agua, 2005).

3 TRABAJO DE CAMPO

3.1 Prospección geoelectrica

Se ejecutaron los siguientes tipos de exploraciones de campo, localizados en los puntos mostrados en la Figura 2.

- Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).
- Calicatas de 20m de longitud.

Fueron usados arreglos del tipo Schlumberger (Ver figura 3) con distancias entre los electrodos AB máximas de 60 m (Balkaya, et al., 2009) (Chica, 1998) (Telford et al, 1990)

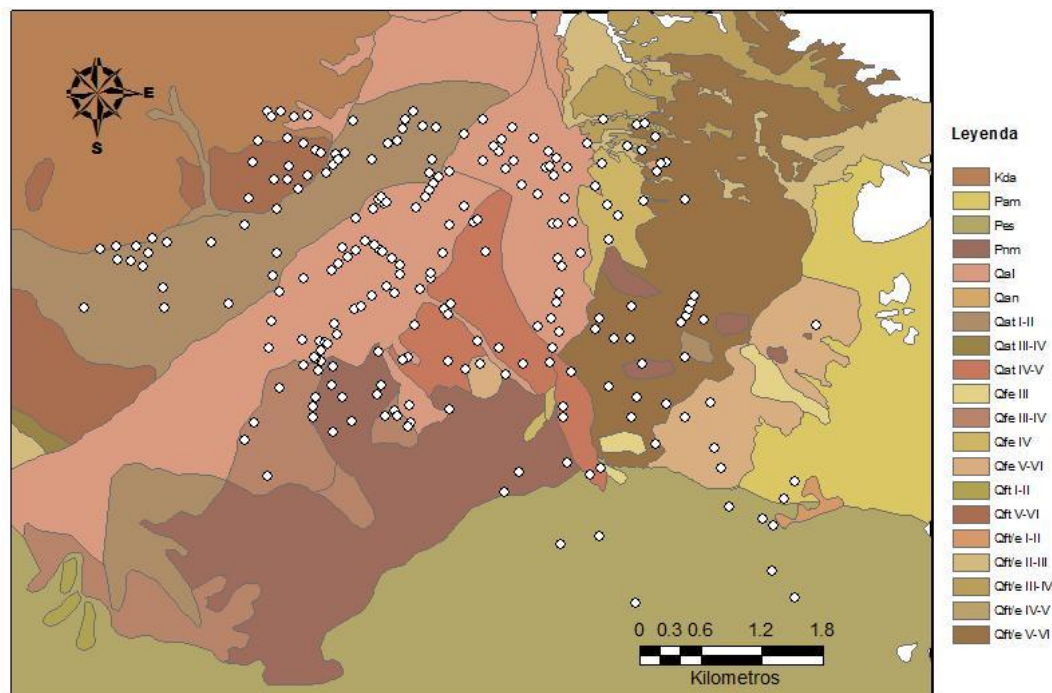


Figura 2. Geología y localización de ensayos (Área Metropolitana, 1998).

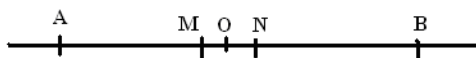


Figura 3: Esquema del arreglo de campo tipo Schlumberger. AB electrodos de corriente, MN electrodos de potencial (Telford et al, 1990).

Tanto para los SEV como para las calicatas se usaron 4 electrodos de acero inoxidable, 2 (A, B), llamados de corriente, que son los que transmiten la corriente eléctrica al terreno; y el otro par son los electrodos denominados de potencial (M, N), en los cuales se mide la diferencia de potencial.

El equipo utilizado consistió en una consola, la cual integra un amperímetro, así como un procesador para tomar las lecturas directas y una fuente de energía, cuatro carretes de cable monopolar, dos de corriente y dos de potencial, cuatro electrodos de acero inoxidable, una brújula, un posicionador global de satélite y demás equipo de apoyo como herramienta menor.

3.2 Localización de los Trabajos de Campo

La exploración se dispuso en el espacio de tal manera que se garantizara una distribución uniforme en el área de estudio. Para esto el área de trabajo se dividió en 114 elementos cuadrados de igual área ($0,25 \text{ km}^2$) en cada uno de los cuales se localizaron por lo menos dos puntos de exploración teniendo en cuenta factores como accesibilidad al sitio, cabida del arreglo de electrodos del ensayo de resistividad y representatividad de cada sondeo en relación con la caracterización apropiada de cada formación. La Distribución final de los ensayos de campo, en contexto con las diferentes unidades geológicas, se muestran en la Figura 2, en donde los puntos blancos representan el centro del arreglo del ensayo de resistividad.

4 ANÁLISIS ESPACIAL

La campaña de campo generó un volumen considerable de datos los cuales debieron ser procesados inicialmente con la utilización de modelos convencionales y posteriormente con geostatística para espacialización de la variable. Se explican a continuación ambos procesos.

4.1 Definición del perfil geoelectrico

Los datos obtenidos en campo (resistividad aparente, distancia MN y distancia AB), se analizaron con el software IPI2WIN para hacer la modelación multicapa. Dicho software fue desarrollado en la Universidad de Moscú, por A. Babacher (Bobachev et al, 2001, 2002). Con este software, se obtuvo una serie de datos para cada uno de los puntos con la siguiente información:

- ρ : Resistividad, en Ωm
- h : espesor de suelo para la resistividad dada, en metros
- d : profundidad para la resistividad dada, en metros

En la Tabla 1 se muestra la forma en la que el programa arroja los datos para uno de los ensayos realizados y en la Figura 5 la curva de resistividad, para la cual se muestra sobre el eje vertical la resistividad en Ωm y sobre el eje horizontal la profundidad en metros. En la figura se pueden observar las curvas de resistividad real (curva continua) y resistividad aparente (curva marcada con círculos) para una profundidad dada. La curva marcada con triángulos representa el modelo sintético necesario para la determinación de la resistividad real.

Tabla 1: Ejemplo de presentación de los datos de resistividad real.

Punto	Resistividad, $\rho(\Omega\text{m})$	$h(\text{m})$	$d(\text{m})$
3B	26.8	3	3
	14.71	7	10

4.2 Análisis Geoestadístico

A partir de los datos arrojados por el programa IPI2WIN, se tomaron los valores de resistividad real que fueron procesados con el software RockWork (RockWare, 1983-2009). Posteriormente se obtuvo el modelo tridimensional producto de la espacialización de la variable resistividad (ρ) para la región de estudio. Para esto se definió un tamaño de Voxel (unidad de análisis básica para el proceso geoestadístico) de $100 \times 100 \text{ m}$ en las dimensiones X y Y y de 2.5 metros en la dirección Z (Ver Figura 6). En este modelo la resistividad está dada en Ωm .

A partir de este modelo básico se obtuvieron mapas bidimensionales para profundidades de 2.5, 5 y 10 m tal y como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9, respectivamente.

Para la validación del modelo continuo fue usado el método *leave one out*, el cual está caracterizado por su sencillez y su eficiencia. Este método consiste en retirar un elemento de la muestra y estimar el valor de la variable en ese punto usando cualquier metodología de espacialización. De forma análoga se actúa para el resto de los elementos de la muestra. Como resultado se obtiene una matriz de las diferencias entre los valores medidos y los estimados, para todos los elementos de la muestra.

De esta forma, si el modelo continuo refleja adecuadamente la estructura espacial implícita en el conjunto de los datos, entonces los valores estimados deben ser cercanos a los observados y las diferencias mínimas (Díaz, 2002). La Figura 10 ilustra este procedimiento. El bloque diagrama de la parte superior de la mencionada figura representa el modelo construido con todos los elementos de la muestra, es decir, todos los datos tomados. El bloque de la parte inferior representa la respuesta del modelo (superficie continua) una vez eliminado uno de los elementos de la muestra (punto de la parte superior izquierda).

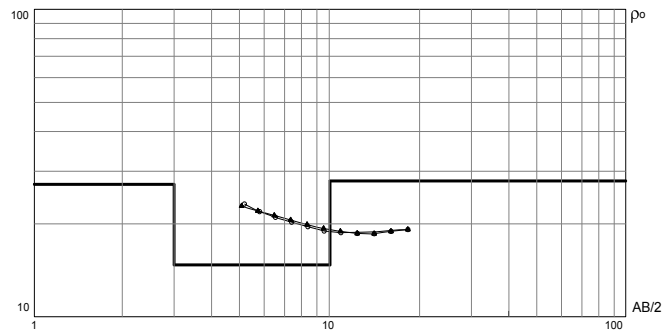


Figura 5: Variación de la resistividad (real y aparente) respecto a la profundidad en el punto 3B.

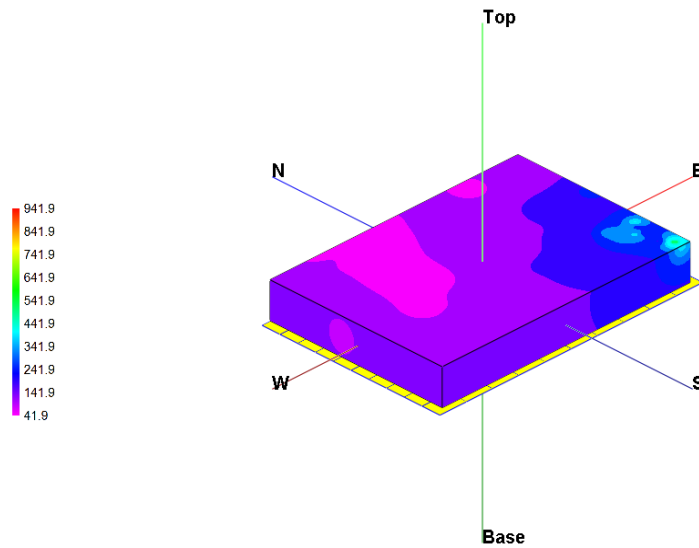


Figura 6: Modelo tridimensional para la región de estudio de la variable Resistividad Eléctrica (ρ).

El análisis del error mostró que el 80% de los puntos tuvieron un error asociado de hasta 10 Ωm y el 20% restante tuvieron un error superior a este valor de los cuales un 2% llegaron a tener diferencias entre el valor real e inferido de hasta 100 Ωm .

5 CONCLUSIONES

Fue verificado que los datos de resistividad eléctrica presentan efectivamente una estructura espacial.

El modelo continuo obtenido tiene asociado un error pequeño el cual se encuentra entre 5 y 10 Ωm para el conjunto completo de datos a las tres profundidades analizadas. Lo anterior, considerando la magnitud de los valores de resistividad obtenidos, del orden de 500 Ωm para la mayoría de las mediciones, sugiere que el modelo es confiable.

La construcción del modelo geoestadístico está influenciada fuertemente por la distribución espacial de los puntos de muestreo. En este caso esta distribución no fue aleatoria, sino que dependió de las características geológicas de la zona, permitiendo una adecuada espacialización de la variable estudiada. Distribuciones

aleatorias de puntos de muestreo en este tipo de estudios conducen a modelos poco robustos debido a que la respuesta geoelectrica es fuertemente dependiente de la naturaleza geológica de los materiales.

La metodología de exploración, modelación y análisis de datos demostró ser adecuada para la caracterización geoelectrica del terreno. Considerando las enormes dificultades inherentes al proceso de análisis de datos con tanta variabilidad como los de resistividad, se considera que esta metodología es adecuada para aplicaciones similares en otras regiones.

Los resultados obtenidos se consideran de alta calidad técnica y de mucho interés académico. Estudios en curso están evaluando las correlaciones entre este parámetro geotécnico y las características de comportamiento mecánico de los suelos locales a través de relaciones entre composición química, mineralógica y plasticidad. De manera ambiciosa se cree probable llegar a estimaciones indirectas de la conductividad hidráulica por medio de asociaciones con la resistividad y tal vez otra variable auxiliar como por ejemplo la plasticidad de los suelos.

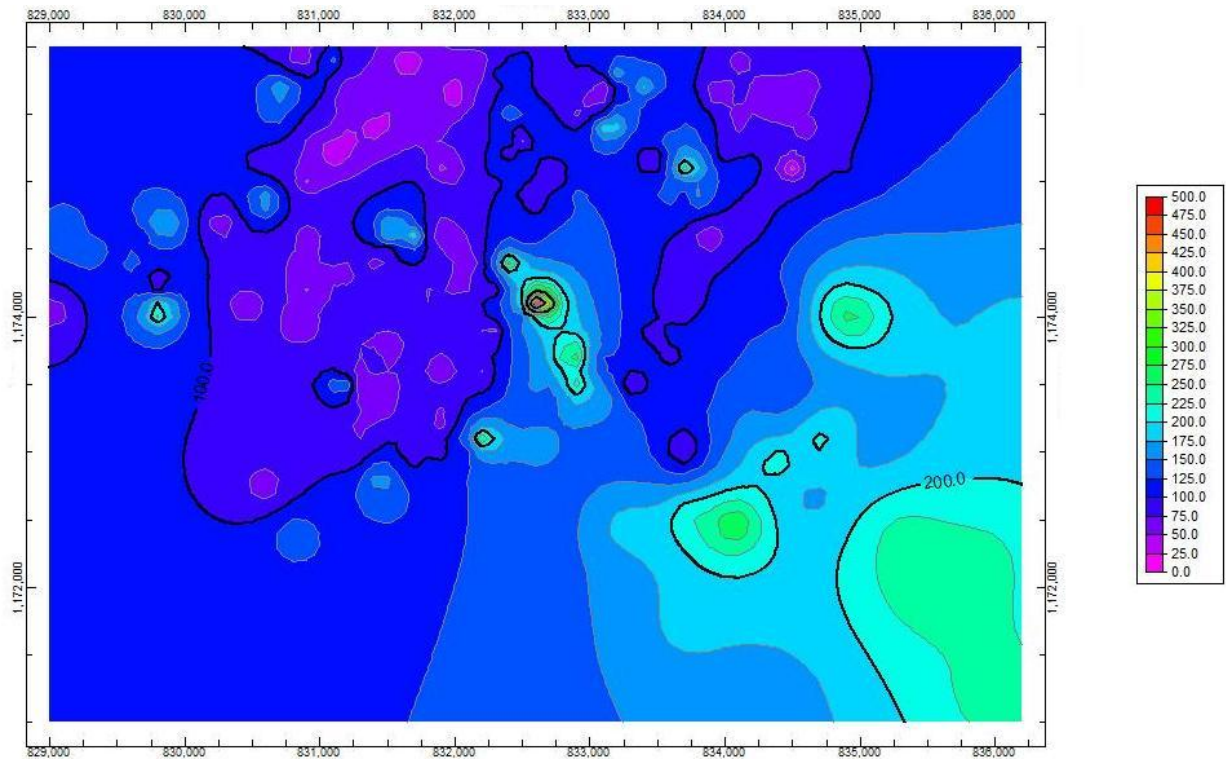


Figura 7. Mapa de Iso-Resistividad Eléctrica a una profundidad de 2.5 m. Escala de valores a la derecha en Ohm-m. Coordenadas en metros con origen Bogotá.

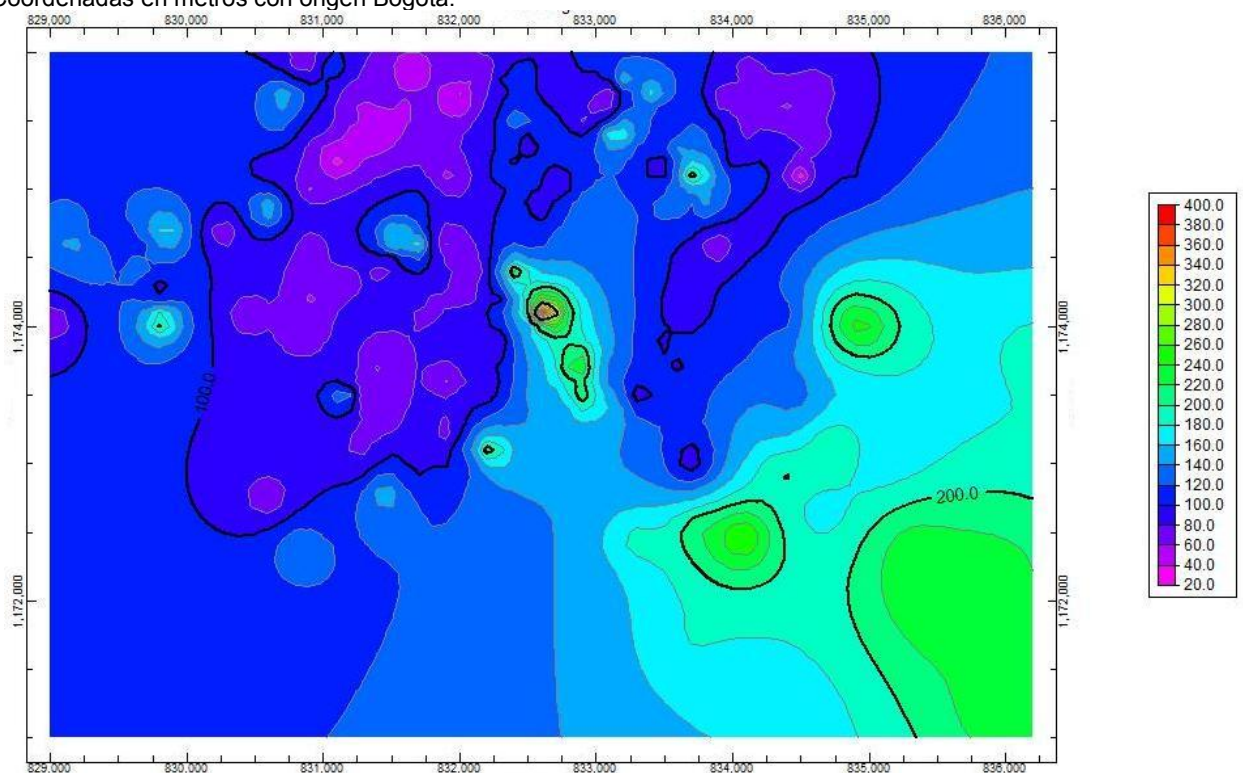


Figura 8. Mapa de Iso-Resistividad Eléctrica a una profundidad de 5 m. Escala de valores a la derecha en Ohm-m. Coordenadas en metros con origen Bogotá.

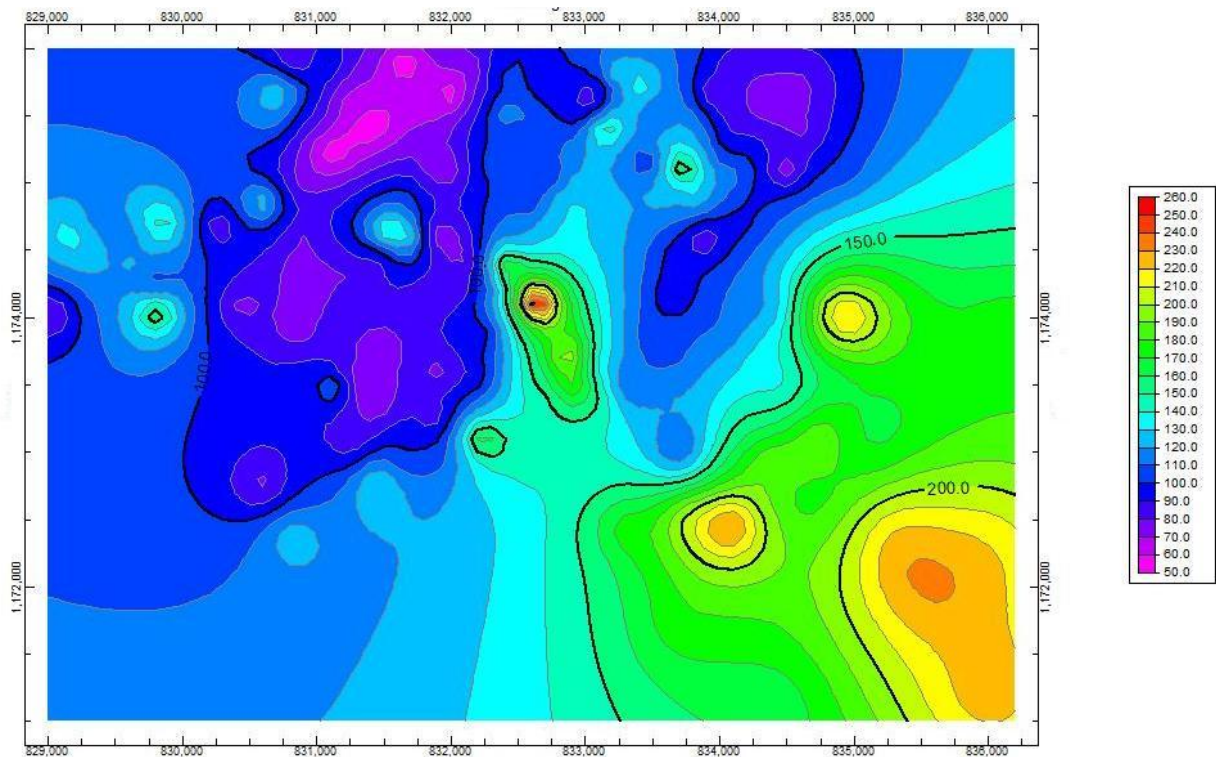


Figura 9. Mapa de Iso-Resistividad Eléctrica a una profundidad de 10 m. Escala de valores a la derecha en Ohm-m. Coordenadas en metros con origen Bogotá.

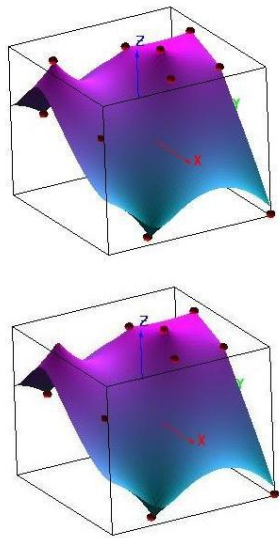


Figura 10: Bloques diagrama usados para explicar el método *leave one out*. (Modificado de (Wave Metrics, 2009)).

Debido a que obtener datos de Resistividad Eléctrica es relativamente barato y al comportamiento espacial marcado de la variable, es posible usar modelos de espacialización de la variable Resistividad Eléctrica, por ejemplo mediante metodologías como el co-Kriging, con

el objetivo de alimentar modelos continuos de otras variables geotécnicas cuyo costo de obtención es mucho más elevado o cuya estructura espacial no es tan marcada.

En esta situación deberá evaluarse la densidad de los datos tomados en relación a las tres dimensiones espaciales, en función de la escala del problema en estudio y de las características espaciales de las variables con las que, por ejemplo, quiere hacerse un análisis del tipo co-Kriging.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Instituto de Estudios de Infraestructura de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, al grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia y a las Empresas Públicas de Medellín por el soporte financiero y apoyo académico para la realización de este trabajo.

7 REFERENCIAS

- Área Metropolitana. Intrumentación y Microzonificación Sísmica de Valle de Aburrá [Report]. - Medellín, Colombia : [s.n.], 1998.
- Balkaya Caglayan, Kaya M. Ali and Gokturkler Gokhan, Delineation of shallow resistivity structure in the city of Burdur, SW Turkey by vertical electrical sounding measurements [Article] // Environ Geol. - 2009. - 571–581 : Vol. 57.

- Bobachev A., Modin I and Shevnin V, IPI2WIN v.2.0, user's [Report]. - [s.l.]: Moscow State University, Moscow., 2001.
- Bobachev A.A., IPI2Win (MT) [Report]. - [s.l.]: Moscow State University, Moscow., 2002.
- Cassiraga E. and Gómez-Hernández J., Comparación de técnicas geoestadísticas para la incorporación de información sísmica en problemas de flujo y transporte de contaminantes. [Conference] // Primera asamblea hispano-portuguesa de geodesia y geofísica y IX asamblea de geodesia y geofísica.. - Aguadulce, Almería, España : [s.n.], 1998.
- Cassiraga E., Incorporación de información blanda para la cuantificación de la incertidumbre: Aplicación a la hidrogeología. [Book]. - [s.l.]: Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, 1999.
- Chica Alejandro, Cuaderno de Ingeniería Geológica. Geofísica Aplicada (Sísmica y Geoelectrica) [Book]. - Medellín, Colombia : Facultad de Minas. Universidad Nacional., 1998.
- Díaz M., Geoestadística Aplicada [Report]. - [s.l.]: Instituto de geofísica, UNAM. Instituto de Geofísica y Astronomía., 2002.
- Hussein Mohammed Tahir and Awada Hussein Salim, Delineation of groundwater zones using lithology and electric tomography in the Khartoum basin, central Sudan [Article] // Comptes Rendus Geosciences. - 2006. - 16 : Vol. 338. - pp. 1213-1218 .
- Instituto del Agua, Identificación, clasificación, características hidrogeológicas de los humedales y evaluación Identificación, clasificación, características hidrogeológicas de los humedales y evaluación de zonas de recarga y su relación con la geología y las corrientes de [Report]. - [s.l.]: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2005.
- Raspa Giuseppe [et al.], Geotechnical characterization of the upper Pleistocene–Holocene alluvial deposits of [Article] // Engineering Geology. - 2008. - Vol. 101. - pp. 251–268.
- RockWare, RockWorks [Report]. - 1983-2009.
- Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E., Applied Geophysics [Book]. - Cambridge : Cambridge University Press, 1990. - Vol. Second Edition.
- Wave Metrics [Online]. - Abril 2009. - <http://www.wavemetrics.com/index.html>.