

MODELIZACIÓN DIRECTA Y COMPARACIÓN DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS

*Mario E. Arias Salguero**

Escuela Centroamericana de Geología, Apdo. 214, 11501-2060
Universidad de Costa Rica

Abstract

With the purpose of comparing the main geoelectrics arrays used for the realization of vertical electrical sounding, a direct simulation is presented, considering two geologic models. The investigation depth, precision in the determination of the thickness of the layers, the effects of the presence of a superficial layer, the geometric similarity and the sensibility to the mensuration of the potential difference are evaluated. It is considered that the most appropriate arrays for vertical electrical sounding are those of Wenner and of Schlumberger. On the other hand; the pole-pole and the dipole-dipole should be used preferably for geoelectrics profiles (constant separation transversing) and electric pseudosections.

Keywords: geoelectrics array, geoelectrics profiles, electrical sonding, direct models.

Palabras clave: dispositivos geoelectricos, perfiles geoelectricos, sondeos electricos, modelos directos.

I. Introducción

La geoelectrica es uno de los métodos geofísicos de prospección con mayor difusión y aplicación en las ciencias de la Tierra. Consiste en la inyección de corriente eléctrica (I) al subsuelo y a partir del potencial (ΔV) generado en el mismo se determina la resistencia (R) del suelo. Este valor de resistencia es transformado a un valor de

* E-mail: marioa@geologia.ucr.ac.cr

resistividad aparente (ρ_a), a partir de una constante geométrica (K) cuya expresión se da en la ecuación (1).

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

El valor final de K para cada medición, dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N).

El sondeo eléctrico vertical, consiste en la utilización de cuatro electrodos geoelectrónicos (A, B, M, N); los cuales dependiendo de su ubicación y distancia dan origen a los diversos dispositivos existentes (Figura 1). En estos sondeos, el centro del dispositivo de los electrodos (o) es fijo y el espaciamiento entre ellos va aumentando para obtener información a mayor profundidad.

La interpretación unidimensional (1D) de los datos de sondeo, presupone que el subsuelo consiste de capas horizontales, homogéneas e isotropas, por lo cual; la resistividad del suelo variará únicamente con la profundidad. Por su parte, la mayor limitación es que en diversos ambientes geológicos las variaciones laterales tienen una gran influencia y generan distorsiones significativas tanto en los datos medidos con los diferentes dispositivos, así como; en la interpretación asociada.

La comparación presentada en este artículo, tiene como objetivo brindar criterios que orienten al investigador en la escogencia del dispositivo utilizado para la realización de los sondeos eléctricos verticales, en función de las características propias de la prospección geoelectrónica a realizar.

II. Métodos

Los principales dispositivos geoelectrónicos

El dispositivo Wenner:

Wenner, establece este método de medición de la resistividad del suelo considerando un sistema de cuatro electrodos alineados y simétricos con el punto de medición [1]. El coeficiente geométrico se simplifica tal como lo expresa la ecuación (2).

$$K = 2\pi a \tag{2}$$

Donde: a es la distancia entre los diferentes electrodos, así $AM = MN = NB = a$.

Una vez efectuada la medición de la resistividad, es necesario desplazar los cuatro electrodos a una nueva separación (equidistante para todos) con el fin de poder realizar la siguiente medición.

Barker, modeló la contribución de la señal eléctrica, evidenciando que este dispositivo en presencia de capas horizontales tiene muy buena resolución vertical [2]. Por su parte, Reynolds estima que este dispositivo presenta: buena resolución vertical,

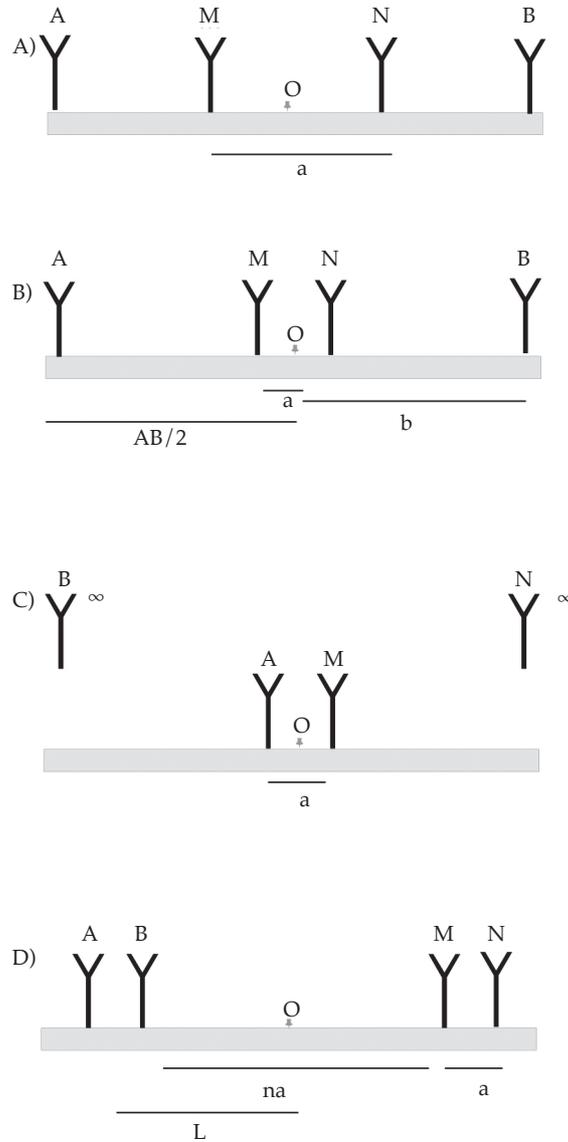


Figura 1. Dispositivos geoelectricos: A) Wenner; B) Schlumberger; C) polo-polo; D) dipolo-dipolo.

pobre profundidad de penetración y una moderada conveniencia para la realización de sondeos eléctricos verticales [3].

El dispositivo Schlumberger:

Schlumberger, pretendía que la distancia $2a$ que separa los electrodos M y N tienda a cero con el fin de medir el campo eléctrico E [4].

En este dispositivo, la relación AB/MN se debe mantener lo más grande posible, en la práctica se tiene que $4 \leq AB/MN \leq 20$, y se cambia la línea MN cuando la medida de la diferencia de potencial es muy pequeña.

El coeficiente geométrico, en este caso se simplifica en la ecuación (3).

$$K = 2 \pi(a^2 - b^2)/2b \quad (3)$$

Presenta ciertas ventajas comparativas:

Frecuentemente; entre dos medidas sucesivas es necesario desplazar solamente un par de electrodos, lo cual reduce el tiempo de ejecución del sondeo. Además; el efecto de variaciones superficiales de la resistividad es constante mientras los electrodos de potencial están fijos [5]. La simulación de la contribución de la señal hecha por Barker evidencia la más alta resolución vertical [2]. Reynolds, considera que este dispositivo presenta una moderada profundidad de investigación, moderada resolución vertical y la mayor conveniencia para la realización de los sondeos eléctricos verticales [3]. Orellana, estima que la calidad de las curvas de campo es superior en este dispositivo, debido a que permanecen fijos los electrodos de potencial de modo que el efecto de la zona superficial donde están hincados permanece constante hasta el próximo traslape [6].

El principal problema que se puede presentar con un dispositivo de este tipo es conservar un ΔV suficientemente grande para ser leído por la instrumentación, ya que a medida que A y B se alejan el ΔV disminuye. Para resolver este problema se puede utilizar alguna de las siguientes recomendaciones [7].

- Aumentar la tensión de la fuente, para aumentar la I y el ΔV .
- Multiplicar los electrodos en A y B, entonces la I y el ΔV serán múltiplos con la condición que los electrodos auxiliares estén a menos de 1,5 metros los unos de los otros.
- Rociar los electrodos A y B con una solución salina.
- En regiones muy secas, realizar sondeos inversos (AB en lugar de MN y vice-versa).
- Incrementar la distancia entre M y N con el fin de aumentar la ΔV medida.

Dispositivo dipolo – dipolo:

Los dispositivos dipolares constituyen una familia caracterizada porque en ellos, los electrodos de corriente (A, B) están lo suficientemente próximos entre sí respecto a la distancia a que se miden sus efectos para que puedan considerarse como un dipolo. Existen dos dipolos, el AB de emisión y el MN de recepción, cuya posición mutua puede ser en principio cualquiera. No obstante, existen ciertas configuraciones que son las más empleadas en la práctica; como el dispositivo polar en el cual los cuatro electrodos son alineados y el dispositivo ecuatorial cuando los dos dipolos son paralelos [6].

Para el dispositivo dipolo-dipolo el coeficiente geométrico esta representado por la ecuación (4)

$$K = 2 \pi(n-1) n (n+1)a \quad (4)$$

Este dispositivo es usado por su gran profundidad de investigación y porque la extensión de cable extendido sobre el terreno es relativamente reducida. Sin embargo presenta dos inconvenientes que hay que tomar en cuenta, ellos son: requiere de una fuente de corriente muy potente y la mayoría de los resultados son influenciados por las variaciones laterales de facies.

A partir de la modelización de contribución de la señal, Barker considera que presenta una pobre resolución vertical y es un dispositivo muy sensible a las variaciones laterales de resistividad [2], estas apreciaciones son compartidas por Reynolds aunque estima que este dispositivo es el que presenta la mayor profundidad de penetración [3].

El dispositivo polo – polo:

En este caso un electrodo de emisión de corriente y otro electrodo de potencial son ubicados lejos tanto entre ellos como de los otros dos electrodos.

En la práctica de campo, estos dos electrodos deben estar al infinito, considerándose al menos 10 veces la distancia a existente entre los otros dos electrodos de medición [5]; por ello, el único término que interviene en el coeficiente geométrico es $1/AM$ y el coeficiente geométrico se simplifica en la ecuación (5)

$$K = 2\pi a \quad (5)$$

III. Resultados**Modelización directa de los diferentes dispositivos**

Para examinar algunas propiedades de los diferentes dispositivos empleados en la realización de sondeos eléctricos y el comportamiento de las curvas de

resistividad aparente correspondientes, fueron utilizados dos modelos geológicos diferentes (Figura 2), uno con dos capas (un sustrato conductor y otro resistente) y otros modelo con tres capas [8].

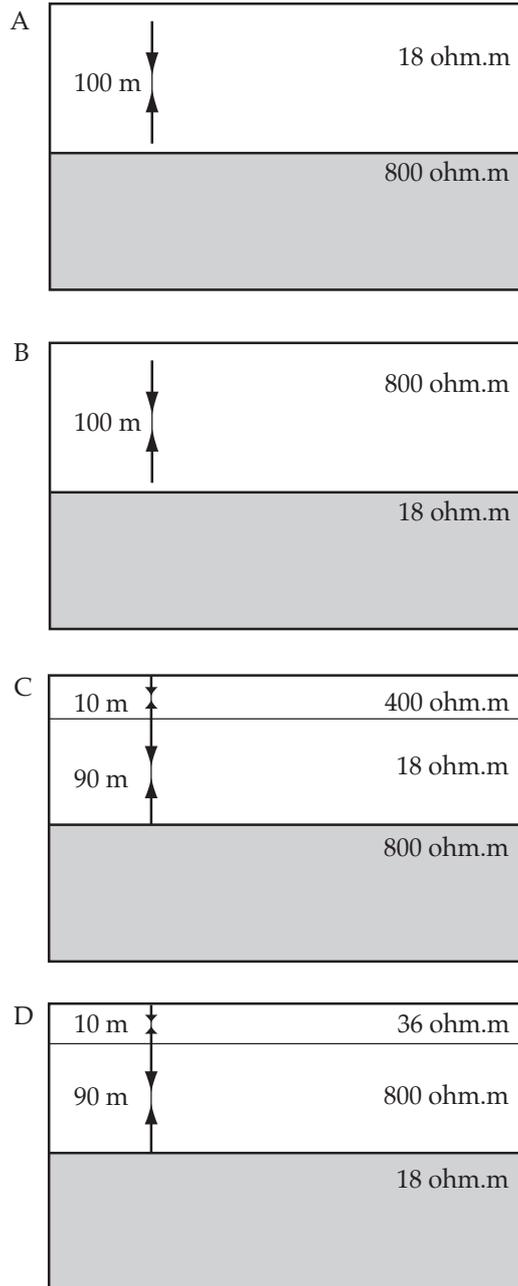


Figura 2. Modelos geológicos utilizados en la modelización: A) modelo a 2 capas: sustrato calcáreo (resistivo); B) modelo a dos capas: sustrato arcilloso (conductor); C) modelo a tres capas: sustrato calcáreo (resistivo); D) modelo a tres capas: sustrato arcilloso (conductor).

El programa de cómputo utilizado fue el QWSELN, el cual realiza la interpretación directa e inversa de los sondeos eléctricos verticales basada en un modelo tabular (inversión eléctrica en 1D). La curva teórica se obtiene calculando la transformada de Hankel y es posible escoger entre los filtros (corto o largo) de Guptasarma y Sing [9] y el de Anderson [10]. Es posible proponer modelos de n capas horizontales ingresando tanto los valores de resistividad, espesor y seleccionando el dispositivo de interés: Wenner, Schlumberger, polo-polo, dipolo-dipolo, e incluye algunos otros como el cuadrado y continuo [11].

Las características evaluadas en los principales dispositivos son:

La profundidad de investigación:

Una representación de la resistividad aparente en función de la semidistancia de los dispositivos: Schlumberger, Wenner, polo - polo y dipolo - dipolo, se realizó para los dos modelos de la Figura 2. Para ello, fue necesario convertir la distancia a la cual es reportada la resistividad aparente de forma convencional en el caso de: Wenner se cambio de a a $3/2a$, mientras que en el polo - polo se cambió de a a $a/2$, con el fin de fijar el parámetro ligado con la geometría y poder compararlo con los otros dos dispositivos.

Los dos gráficos presentados (Figuras 3a y 3b); permiten constatar las diferencias en la profundidad de investigación que presentan los diferentes dispositivos.

La resistividad aparente que se obtiene, comienza para todos los casos en el valor de la resistividad real del primer terreno, la transición hacia los valores de resistividad descendentes (caso del sustrato arcilloso) o ascendente (sustrato calcáreo) no se presenta de la misma manera, ya que comienza a variar con anterioridad en el dispositivo polo - polo y el comportamiento asintótico de la curva puede ser constatado desde cuando el desplazamiento entre los electrodos es igual a la mitad del espesor de la primer capa.

La curva de resistividad aparente del dispositivo Schlumberger se despega de la resistividad real del primer terreno a partir del momento en que $AB/2$ es igual a 0,5 veces el espesor del primer terreno. La asíntota que es utilizada en la interpretación no es puesta en evidencia hasta que la semidistancia del dispositivo sea dos veces más grande que el espesor del primer terreno.

Para el caso de la curva Wenner, esta comienza de una manera muy similar al dispositivo Schlumberger pero desciende un poco más rápido.

La curva del dispositivo dipolo - dipolo, primero remonta a un máximo de resistividad aparente, que es mayor que la resistividad real de la primera capa, esto antes de pasar a un comportamiento asintótico y descender con una pendiente muy fuerte.

La precisión en el espesor de las capas:

Al examinar el efecto de variar el espesor de una capa, se comprueba que existe un máximo de resolución; así un intervalo de incertidumbre se puede establecer hasta un 5%, siendo esto aplicable para cualquiera de los dispositivos y de la naturaleza de

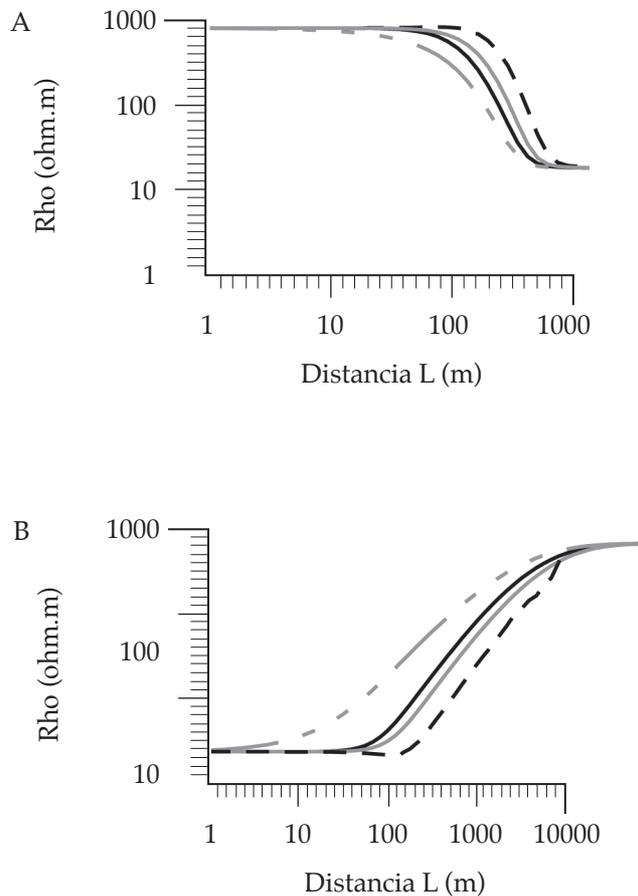


Figura 3. Modelización de la profundidad de investigación de los diferentes dispositivos. Schlumberger (línea continua negra), Wenner (línea continua gris), Polo-Polo (línea discontinua gris); Dipolo-Dipolo (línea discontinua negra). A) sustrato conductor; B) sustrato resistente.

los terrenos estudiados. En efecto, la curva representativa de la resistividad aparente en el caso de un modelo de dos terrenos con sustrato resistente, donde la primera capa tiene un espesor de 100 m es apenas diferenciable del modelo en el cual el espesor es de 95 m. La misma conclusión puede darse para un modelo con sustrato conductor (Figuras 4a y 4b).

Efecto de la presencia de una capa superficial:

Para poner en evidencia el impacto que genera la presencia de una capa superficial sobre los perfiles de los diferentes tipos de sondeos, se superpuso un terreno resistente y poco espeso sobre el modelo de dos capas con sustrato calcáreo y de la misma manera una capa conductora sobre aquel de sustrato conductor (Figuras 5a y 5b).

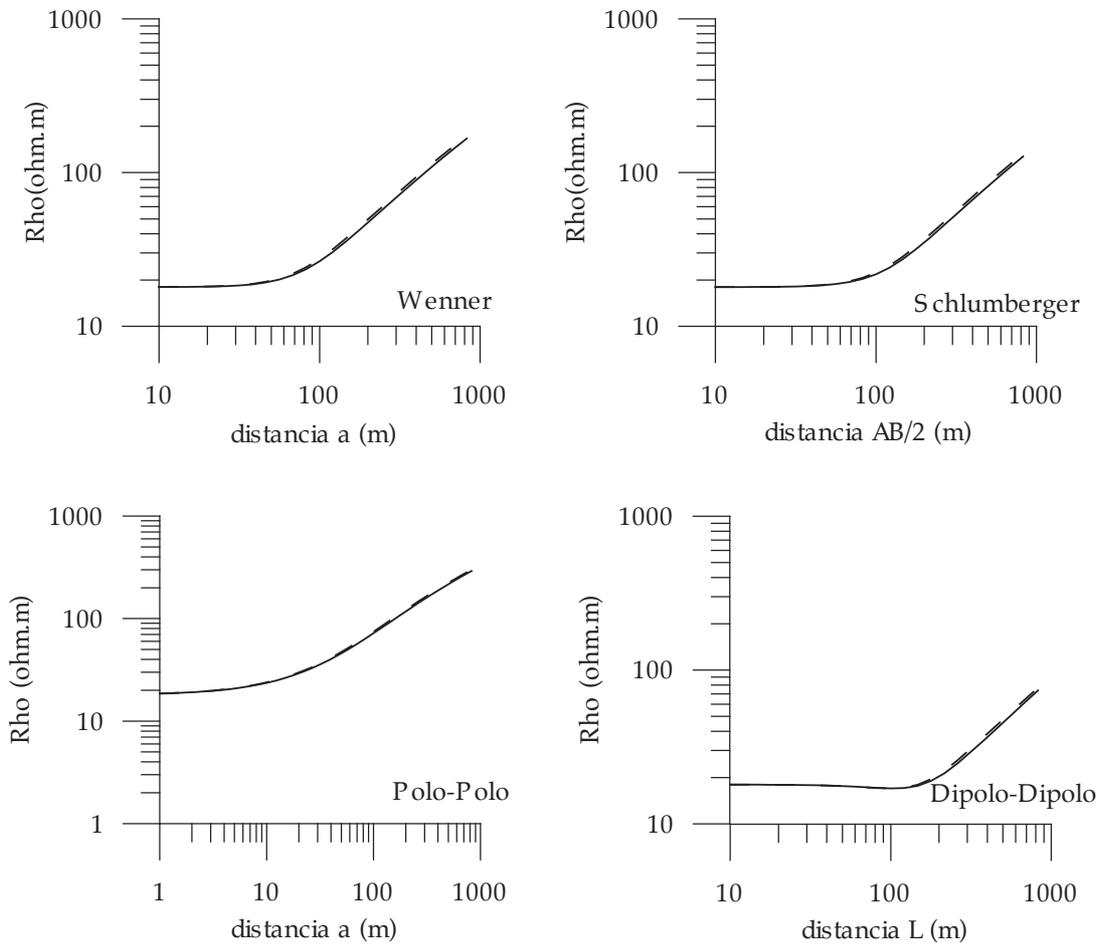


Figura 4a. Precisión en la determinación del espesor del modelo de 2 capas, sustrato calcáreo (resistivo).

Es claro que el efecto producido por la capa resistiva repercute sobre en el comienzo de la curva ligado al primer modelo, mientras que la conductora afecta prácticamente toda la curva.

Así partiendo de la resistividad real de la capa resistente, la curva desciende hasta alcanzar un valor ligeramente superior a la resistividad real de la segunda capa.

Por su parte, la capa conductora ha impuesto un comportamiento completamente diferente sobre la forma de la curva, esta comienza también del valor real del primer terreno, pero se requiere un desplazamiento mucho mayor entre los electrodos para hacer aparecer el máximo de resistividad correspondiente al terreno intercalado; por otra parte, el valor de resistividad aparente de esta capa es menor que su valor

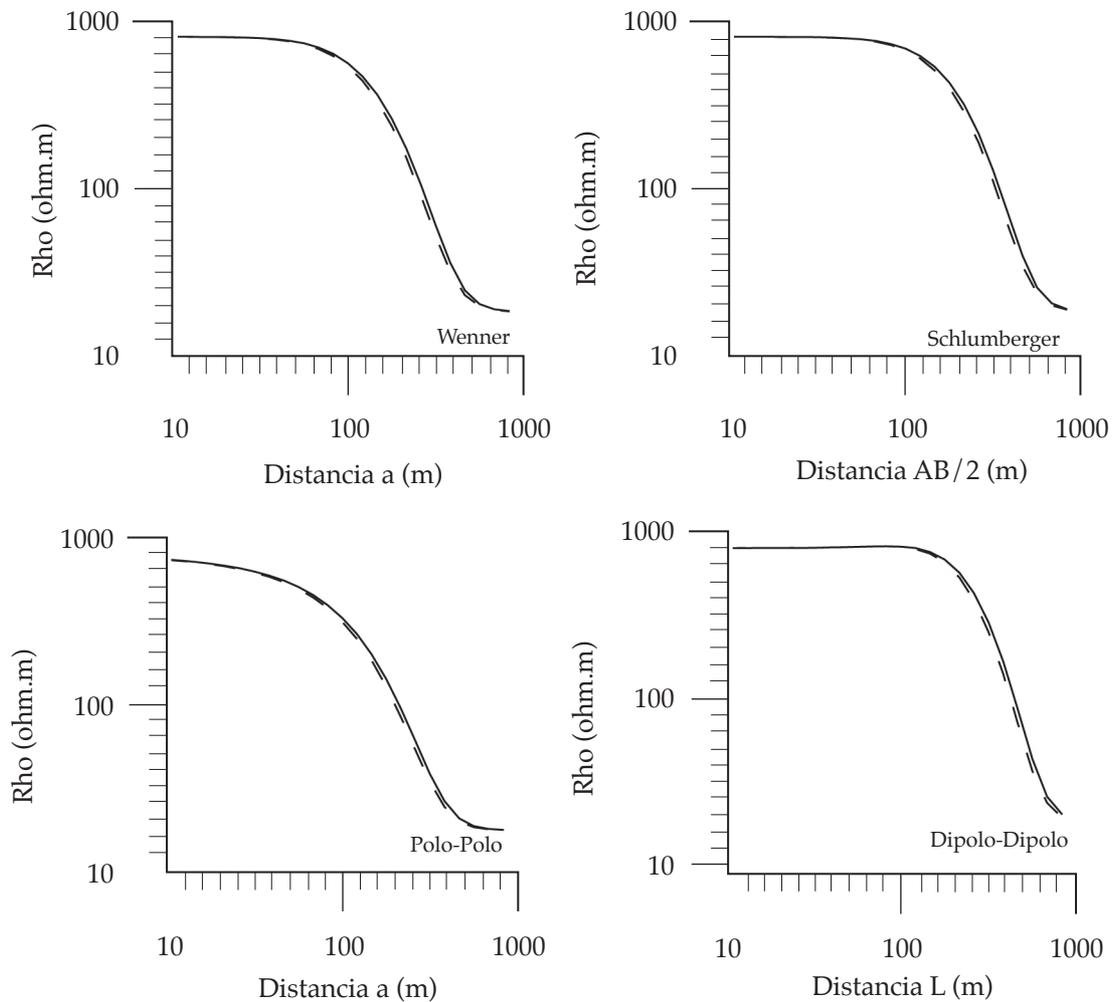


Figura 4b. Precisión en la determinación del espesor del modelo de 2 capas, sustrato arcilloso (conductor).

de resistividad real. Además las dos asíntotas ligadas al tercer terreno se encuentran desplazadas, lo cual indica que este último terreno no puede ser detectado sino se aumenta la distancia entre los electrodos, lo cual influye sobre el tiempo de medición y el costo económico de los diferentes sondeos.

La similitud geométrica:

Para evidenciar esta propiedad característica de los sondeos eléctricos, se ha superpuesto sobre la curva de resistividad aparente del primer modelo con sustrato resistente, la curva resultante de multiplicar el espesor de la primera capa por un factor de 5 (Figura 6a). La misma operación se realizó para el modelo con sustrato conductor

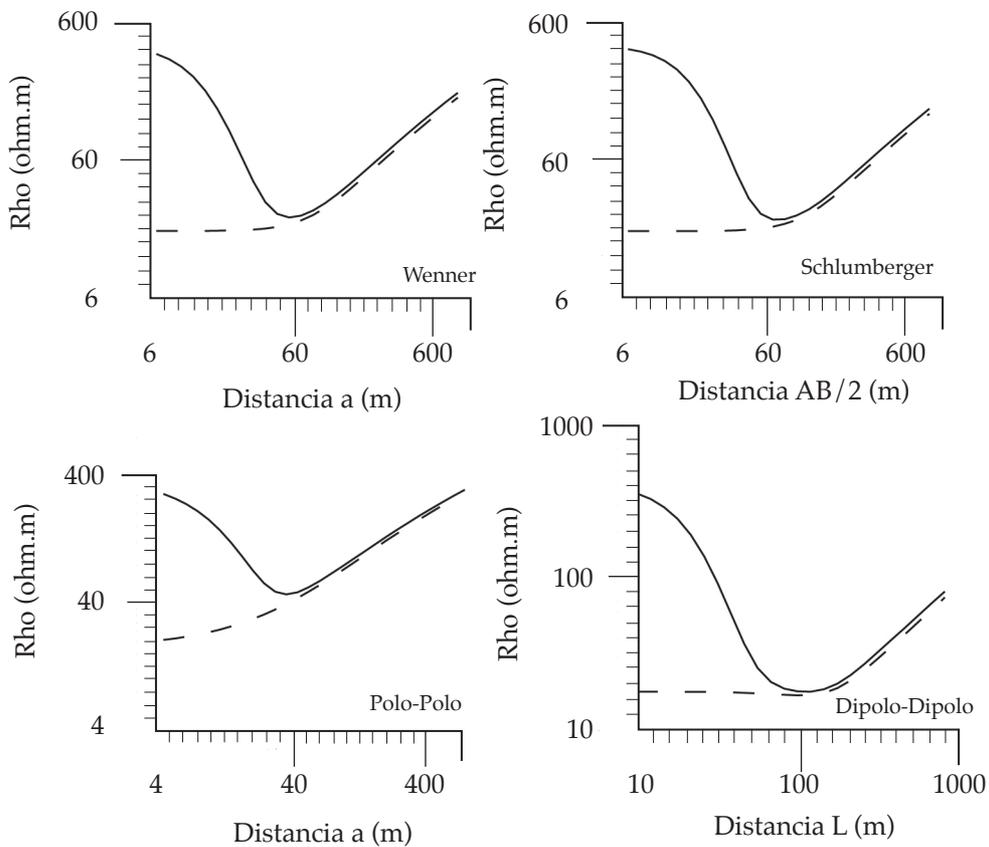


Figura 5a. Efecto de la presencia de una capa superficial resistiva. Línea continua: modelo de 3 capas. Línea discontinua: modelo de 2 capas, sustrato calcáreo (resistivo).

pero en esta ocasión multiplicándolo por un factor de $1/20$ (Figura 6b). El efecto de estas modificaciones se traduce en ambos casos en una traslación horizontal con una amplitud en la cual el valor absoluto es igual al coeficiente utilizado y denominado de similitud. La distancia entre los electrodos para encontrar el sustrato aumenta o disminuye en función del espesor del primer terreno.

La sensibilidad:

Este es un parámetro que muestra características específicas en relación con el tipo de dispositivo. Para percibirla se han representado para el mismo modelo de terreno, la diferencia de potencial medida en función de la semidistancia de los diferentes dispositivos (Figura 7). Es evidente que para las distancia cortas de recepción de los electrodos la ΔV medida no presenta una gran variabilidad de un tipo de dispositivo al otro. Sin embargo cuando se aumenta la distancia entre los electrodos, un

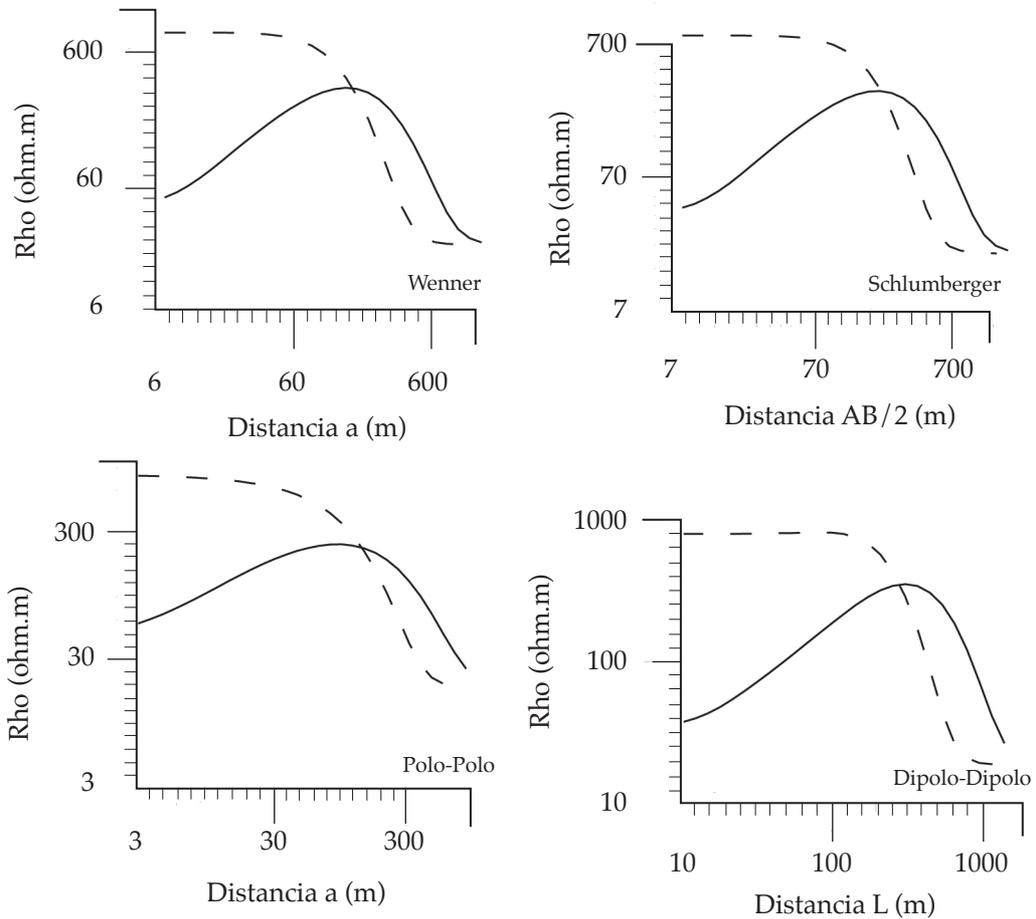


Figura 5b. Efecto de la presencia de una capa superficial conductora. Línea continua: modelo de 3 capas. Línea discontinua: modelo de 2 capas, sustrato calcáreo (conductor).

contraste muy marcado de potencial es puesto en evidencia entre los diferentes dispositivos, así el dipolo-dipolo mide los valores más bajos de ΔV para un mismo $AB/2$ en comparación con los otros dispositivos. El Schlumberger presenta una curva en forma de escalera, debido a los traslapes o cambios de la distancia entre los electrodos MN y su forma general permite decir que mide un ΔV más importante que el dipolo-dipolo. El Wenner y polo-polo son los dispositivos más potentes para la medida de potencial, lo cual permite decir que son los dispositivos que no exigen una gran sofisticación de la instrumentación, además que presentan una menor sensibilidad al ruido contrariamente a lo que ocurre con el dipolo-dipolo.

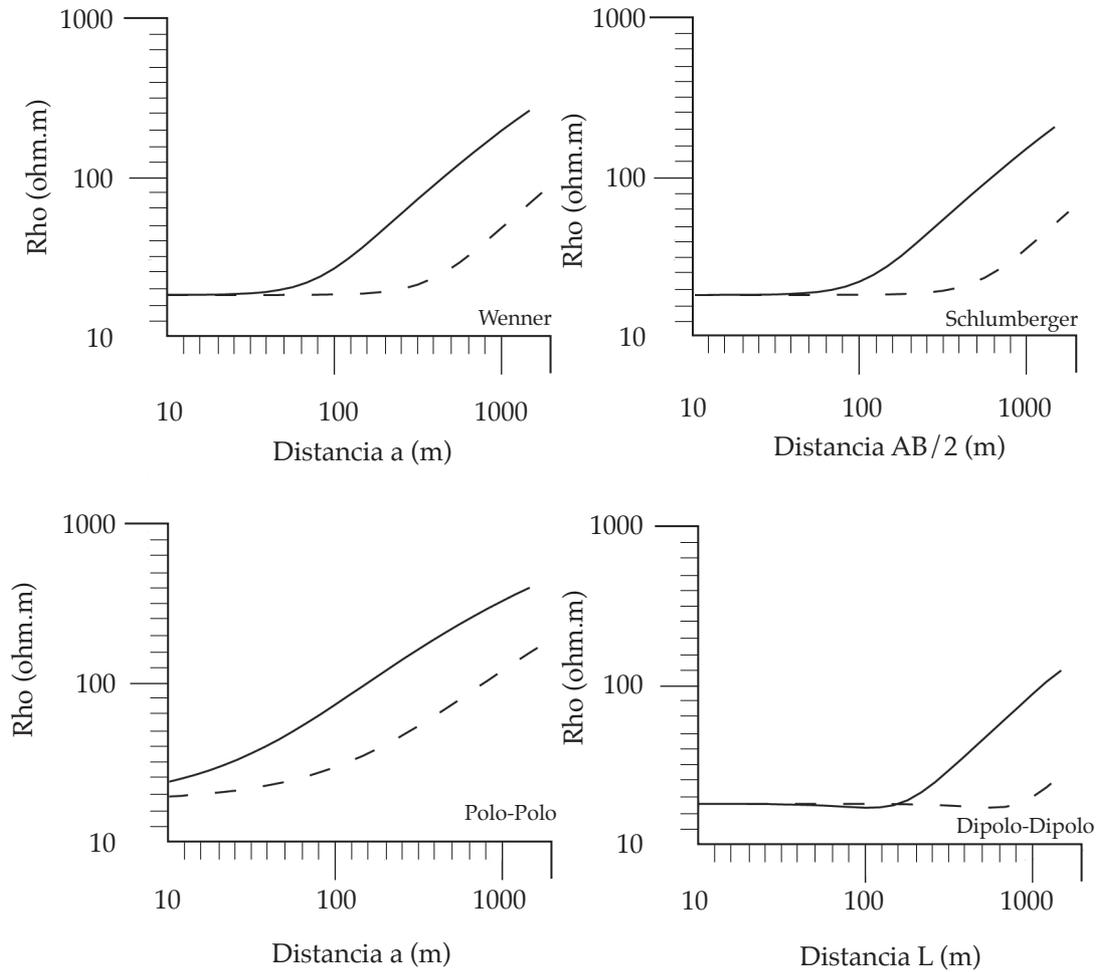


Figura 6a. Efecto de la similitud geométrica. Modelo de 2 capas, sustrato calcáreo (resistivo). Línea discontinua: espesor 500 m. Línea continua: espesor 100 m.

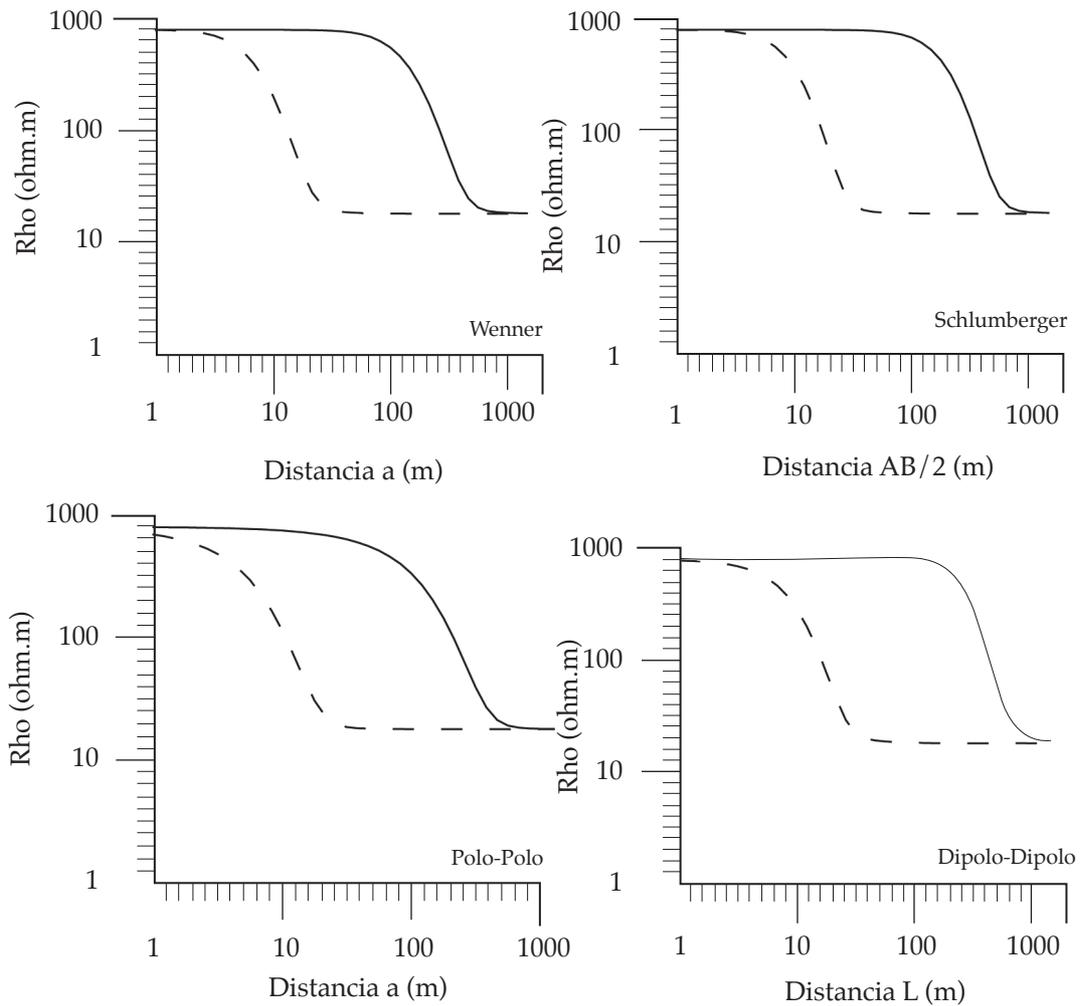


Figura 6b. Efecto de la similitud geométrica. Modelo de 2 capas, sustrato arcilloso (conductor). Línea discontinua: espesor 5 m. Línea continua: espesor 100 m.

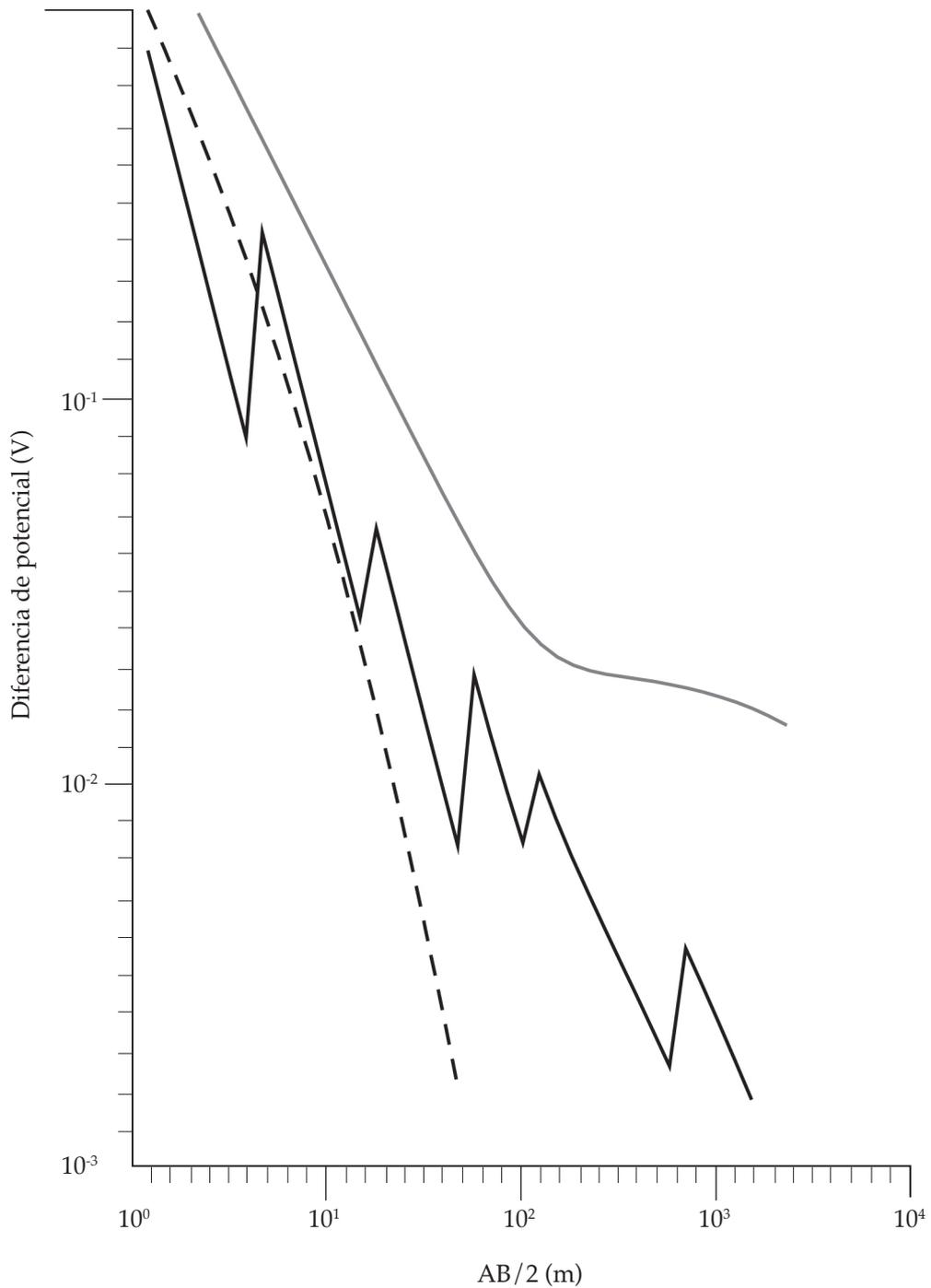


Figura 7. Sensibilidad a la medición de la diferencia de potencial en los diferentes dispositivos geoelectricos: Wenner y polo (línea continua gris); Schlumberger (línea continua negra); dipolo-dipolo (línea discontinua negra).

IV. Conclusiones

Al analizar la profundidad de investigación de los diferentes dispositivos, queda claro que el polo-polo subestima el espesor establecido, mientras que el dipolo-dipolo lo sobreestima. Por su parte, tanto el Wenner como Schlumberger modelan correctamente el espesor teórico.

La resolución al variar el espesor de las capas es igual en todos los casos analizados, por lo cual se puede establecer según esta modelización un intervalo de incertidumbre de hasta un 5 %.

La existencia de una capa superficial y resistente en el modelo, incide con mayor efecto en la segunda capa de todos los dispositivos analizados, pues debido a este terreno superficial el espesor representado en el gráfico se disminuye y se sobreestima el valor de resistividad aparente con respecto al valor de resistividad real.

La existencia de una capa superficial y conductora en el modelo, genera en todos los dispositivos, un desplazamiento de la curva que incide en la abertura necesaria de los electrodos de medición con el fin de poder detectar las capas subyacentes, en especial el comienzo de la tercera capa, este efecto es más evidente en el dispositivo polo-polo. Provoca además, que el valor de resistividad aparente sea menor que el valor de resistividad real.

El efecto de la similitud geométrica en el caso del sustrato resistente evidencia que en los dispositivos Wenner y Schlumberger se mantiene el valor de resistividad real modelado, mientras que en el polo-polo y dipolo-dipolo existe un efecto de la resistividad aparente en el cual, la curva no mantiene el valor de resistividad modelado (real).

El efecto de la similitud geométrica demuestra que la aplicación de los sondeos eléctricos se puede utilizar a diversas escalas en función del objetivo de la investigación.

La comparación de la sensibilidad de los dispositivos a la medición de la diferencia de potencial (ΔV) muestra que tanto el Wenner y el polo-polo miden los valores mayores para una misma separación de los electrodos, por su parte; el dipolo-dipolo es el más afectado por el efecto del ruido electromagnético debido a la capacidad de medición reducida del ΔV .

Integrando la información de esta modelización con las referencias bibliográficas citadas anteriormente, se puede establecer que los dispositivos más apropiados para la realización de los sondeos eléctricos verticales son el Wenner y el Schlumberger. Por su parte, el polo-polo y el dipolo-dipolo deberían utilizarse preferentemente en la realización de perfiles geoléctricos (calicatas) y pseudosecciones eléctricas.

Las características de campo, entre ellas: el control en la calidad de la curva, la facilidad de puesta de obra en el campo, así como la cantidad de personal necesario para realizar un sondeo, hacen preferible el dispositivo Schlumberger sobre el Wenner en la mayoría de los casos.

V. Referencias

- [1] WENNER, F., *US Bureau of Standards Bulletin*. **1912**, 12, 469-478.
- [2] BARKER, R.D. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. **1979**, 59 (1), 123-129.
- [3] REYNOLDS, J. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley: London, 1997, 796 pp.
- [4] SCHLUMBERGER, C. *Etude sur la prospection électrique du sous-sol*. Guthier-Villars: París, 1929, s.p.
- [5] TELFOR, W., GELDART, L. & SHERIFF, R. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press: London, 1990, 770 pp.
- [6] ORELLANA, E. *Prospección Geoelectrica en corriente continua*. Paraninfo: Madrid, 1972, 523 pp.
- [7] MEYER DE STADELHOFEN, C. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Lavoisier: Paris, 1995, 177 pp.
- [8] ARIAS, M. E. *Les méthodes de sondages électriques et électromagnétiques : Exemples d'application en Hydrogéologie*, Thèse de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1999.
- [9] GUPTASARMA, D., & SING., B., *Geophysical prospecting* **1997**, 45, 745-762.
- [10] ANDERSON, W.L., *Geophysics* **1979**, 44, 1287-1305.
- [11] TABBAGH, J., *Documentation QWSELN: programme de sondage électrique*. Département de Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie Curie: Paris, 2003, 20 pp.

