ESTUDO COMPARATIVO DOS ARRANJOS WENNER E SCHLUMBERGER APLICADOS À SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL

JOAQUINA L. LEITE* e JOSÉ WILSON P. MACÊDO**

ABSTRACT The geophysical method of geoelectrical prospecting involves passing a electric current through the Earth by means of two electrodes and measuring the resulting potential difference between two points of the Earth surface, by means of two potential electrodes. These electrodes may be disposed of different manners, resulting different configurations. In the vertical resistivity soundings, the configurations more used are the Wenner and the Schlumberger. The present paper is a critical revision of the advantages presented for both the configurations, under various viewpoints: operation in the field, depth of exploration, quality of the field apparent resistivity curves, vertical resolution, effects of lateral resistivity variation, rapid check of the resistance measurements made in the field and precision required for the equipment. As result, were concluded that Wenner configuration requires less precise equipment and permits rapid check of the resistance measurement, better control of the effects of lateral resistivity variation and greater vertical resolution. The Schlumberger configuration is less sensitive to errors of spacing electrodes and permits more rapid field operation and to obtain better apparent resistivity curves.

INTRODUÇÃO O método mais utilizado para medir a resistividade do subsolo consiste geralmente em se fazer passar através da Terra uma corrente contínua I mediante dois eletrodos, A e B , e medir a diferença de potencial resultante, $\Delta\phi$, entre dois pontos da superfície, por meio de dois outros eletrodos, M e N . A disposição desses quatro eletrodos pode variar bastante, dando origem a diversos arranjos. Entre estes, os mais amplamente usados são o Wenner e o Schlumberger, nos quais os quatro eletrodos são colineares. O segundo é mais utilizado na França e União Soviética, enquanto o Wenner é mais aplicado nos Estados Unidos e Inglaterra. As vantagens e desvantagens apresentadas por cada um desses dois arranjos têm sido relatadas por algumas poucas publicações (Carpenter, 1956; Zohdy, 1968; Keller, 1970; Roy e Apparao, 1971; Orellana, 1972; etc.). Neste trabalho será feita uma análise crítica das vantagens apresentadas por cada arranjo, visando orientar os usuários da sondagem elétrica na escolha do arranjo de eletrodos mais conveniente para seu trabalho de campo.

Podemos distinguir duas técnicas de medida de resistividade. Só vamos considerar a técnica chamada de sondagem elétrica vertical, na qual as posições dos eletrodos são variadas em relação a um centro fixo e as medidas realizadas refletem variações verticais da eletrorresistividade do subsolo, sob o ponto tomado como centro do arranjo. Para a interpretação das medidas, necessitamos computar a função resistividade aparente, ρ_a , obtida a partir das leituras feitas no campo por meio da equação:

$$\rho_a = \frac{K \cdot \Delta\phi_{MN}}{I} \quad (1)$$

em que K é chamada de constante geométrica e depende do arranjo de eletrodos.

A Eq. (1) mostra que a função resistividade aparente depende não só do subsolo estudado mas também do arranjo de eletrodos. Daí a importância de se escolher criteriosamente o arranjo a ser utilizado.

OS ARRANJOS WENNER E SCHLUMBERGER

O arranjo Schlumberger constitui-se de quatro eletrodos colineares (Fig. 1). Os dois mais internos, que medem a diferença de potencial, estão localizados próximos do centro do arranjo e sua separação é pequena, comparada com a distância entre os eletrodos de corrente. Com uma tão pequena separação, a diferença de potencial medida dividida pela distância entre os eletrodos é aproximadamente igual ao campo elétrico no ponto médio da sondagem.

Figura 1 – Arranjo Schlumberger: A e B são eletrodos de corrente; M e N são eletrodos de potencial

Na realização da sondagem, a separação entre os eletrodos mais externos, que injetam corrente à Terra, é aumentada para cada medida enquanto a separação entre os eletrodos de potencial é mantida constante até onde se possa medir a diferença de potencial.

* Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências da UFBA, Salvador, Bahia, Brasil

** Departamento de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

Para o arranjo Schlumberger, a constante geométrica K é calculada pela Eq. abaixo (Fig. 1):

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{a - \frac{b}{2}} - \frac{1}{a + \frac{b}{2}} - \frac{1}{a + \frac{b}{2}} + \frac{1}{a - \frac{b}{2}}} = \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (2)$$

$$K_{ex} = \frac{\pi a^2}{b} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right) \quad (2)$$

Este é o valor exato da constante geométrica. Sendo $b^2/4a^2 \ll 1$, podemos desprezar essa parcela na Eq. (2), de modo a obtermos um valor aproximado para K :

$$K_{ap} \approx \frac{\pi a^2}{b} \quad (3)$$

Na prática, usa-se para a disposição Schlumberger o valor de K aproximado. É necessário analisar esta aproximação quanto ao seu significado físico e a sua implicação operacional.

Para examinar o significado físico, substituir na Eq. (1) o valor exato de K :

$$\Delta\phi_{MN} = \rho a \cdot I \cdot \frac{1}{\frac{\pi a^2}{b} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right)} \quad (4)$$

Sendo $b^2/4a^2 < 1$, podemos expandir o binômio da Eq. (4) em série de potências de $b^2/4a^2$. Assim:

$$\Delta\phi_{MN} = \frac{\rho a \cdot I \cdot b}{\pi a^2} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right)^{-1}$$

$$\Delta\phi_{MN} = \frac{\rho a \cdot I \cdot b}{\pi a^2} \left[1 + \frac{b^2}{4a^2} + \left(\frac{b^2}{4a^2} \right)^2 + \dots \right] \quad (5)$$

Por outro lado, sendo o potencial uma função contínua nos pontos M e N , podemos expandir a função potencial em série de Taylor, em torno da origem (ponto central do arranjo):

$$\phi_M = \phi \Big|_{x=0} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} \cdot OM + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \cdot OM^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_{x=0} \cdot OM^3 + \dots \quad (6)$$

$$\phi_N = \phi \Big|_{x=0} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} \cdot ON + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \cdot ON^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_{x=0} \cdot ON^3 + \dots \quad (7)$$

$$\Delta\phi_{MN} = \phi_M - \phi_N$$

$$\Delta\phi_{MN} = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} \cdot (ON - OM) - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \cdot (ON^2 - OM^2) - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_{x=0} \cdot (ON^3 - OM^3) \dots \quad (8)$$

Orientando o eixo x de coordenadas de modo que seja positivo de O para B , e utilizando a definição de campo elétrico.

$$E = - \text{grad } \phi \quad (9)$$

teremos:

$$ON = \frac{b}{2}; OM = -\frac{b}{2}; - \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = E \Big|_{x=0} \quad (10)$$

Substituindo (10) em (8), teremos:

$$\Delta\phi_{MN} = E \Big|_{x=0} \cdot b + \frac{1}{24} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} \Big|_{x=0} \cdot b^3 + \dots \quad (11)$$

Comparando (11) e (5) teremos, pela igualdade dos coeficientes multiplicativos de igual potência de b :

$$E \Big|_{x=0} = \frac{\rho a \cdot I}{\pi a^2} \quad (12)$$

em que $E|_{x=0}$ representa o campo elétrico no ponto central do arranjo Schlumberger. Introduzindo agora o valor aproximado de K na expressão (1):

$$\rho a = \frac{\pi a^2}{b} \cdot \frac{\Delta\phi_{MN}}{I} \quad (13)$$

Substituindo (13) em (12)

$$E \Big|_{x=0} = \frac{\pi a^2}{b} \cdot \frac{\Delta\phi_{MN}}{I} \cdot \frac{I}{\pi a^2}$$

$$E \Big|_{x=0} = \frac{\Delta\phi_{MN}}{b} \quad (14)$$

A Eq. (14) mostra que a aproximação $K = \pi a^2/b$ no arranjo Schlumberger de eletrodos tem como significado físico aproximar o valor do campo elétrico no ponto central do arranjo ao quociente $\Delta\phi_{MN}/b$.

Do ponto de vista operacional, essa aproximação implica a necessidade de manter-se, na prática, uma relação b/a tal que o erro introduzido por essa aproximação não seja superior ao erro instrumental somado ao ruído produzido por campos naturais, em geral próximo de 5%. O erro relativo resultante dessa aproximação é definido como:

$$\varepsilon = \frac{K_{ap} - K_{ex}}{K_{ex}} \times 100 = \frac{\frac{b^2}{4a^2}}{1 - \frac{b^2}{4a^2}} \times 100 \quad (15)$$

Como $b^2/4a^2 < 1$, podemos expandir o binômio do segundo membro da Eq. (15) em potências de $b^2/4a^2$:

$$\varepsilon = \frac{b^2}{4a^2} \left(1 - \frac{b^2}{4a^2} \right)^{-1} \times 100$$

$$\varepsilon = \frac{100 b^2}{4a^2} \left(1 + \frac{b^2}{4a^2} + \left(\frac{b^2}{4a^2} \right)^2 + \dots \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon \approx \frac{b^2}{4a^2} \times 100 \quad (17)$$

Para que se limite o erro em 5%, teremos:

$$\frac{100 b^2}{4a^2} < 5 \text{ ou } \frac{b}{a} < 0,45 \quad (18)$$

A relação (18) deve ser sempre obedecida no campo para que a aproximação de K não conduza a erros superiores a 5%. A razão pela qual sempre se faz a aproximação do valor de K se deve ao fato de as curvas-padrão teóricas, com as quais se comparam as curvas de resistividade aparente observadas no campo para fins de interpretação, serem calculadas usando o valor exato do campo elétrico no ponto central entre A e B .

O arranjo de Wenner constitui-se de quatro eletrodos colineares e equidistantes (Fig. 2).

O fator geométrico é calculado pela expressão:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

Sendo $AM = a$; $AN = 2a$; $BM = 2a$; e $BN = a$, o fator geométrico simplifica-se para

$$K = 2\pi a \quad (19)$$

Figura 2 – Arranjo Wenner

COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS ARRANJOS

O objetivo deste trabalho é discutir as vantagens e desvantagens do uso dos arranjos Schlumberger e Wenner, sob vários pontos de vista, tais como: operacional; profundidade de investigação e resolução vertical; efeitos de inomogeneidades laterais e superficiais; erros de medida do espaçamento dos eletrodos; aparelho de medidas; e checagem das leituras no campo.

Aspecto operacional Na realização de uma sondagem elétrica, o centro do arranjo é mantido fixo. No arranjo Wenner, após cada leitura, todos os quatro eletrodos são afastados do centro, mantendo-os equidistantes. No arranjo Schlumberger, uma série de leituras é feita com os eletrodos de potencial mantidos fixos, deslocando-se apenas os eletrodos de corrente a cada nova leitura. Só quando a diferença de potencial se torna muito pequena, portanto difícil de ser medida, é que a separação entre os eletrodos de potencial é aumentada. Dessa forma, do ponto de vista operacional, o arranjo Schlumberger é mais vantajoso que o Wenner, pois seus eletrodos de potencial são movidos muito pouco em cada sondagem, o que representa economia de tempo e espaço físico.

Presença de heterogeneidade lateral Os procedimentos de interpretação de sondagens elétricas verticais presumem que os dados obtidos no campo sejam devidos a uma subsuperfície formada de camadas paralelas e homogêneas. Contudo, normalmente encontramos variações locais de resistividade no subsolo, devidas às fácies sedimentares, corpos intrusivos, variações do mergulho das camadas, anomalias do solo etc., que tendem a produzir irregularidades na curva de resistividade aparente, dificultando sua interpretação. O arranjo de eletrodos que melhor contorna essa dificuldade, seja diminuindo os efeitos dessas inomogeneidades de resistividade sobre a curva ρ_a , seja dando informações sobre suas consequências, apresenta uma vantagem valiosa ao intérprete.

Alguns pesquisadores (Orellana, 1972; Kunetz, 1966) analisaram comparativamente os dois arranjos, considerando apenas os efeitos de heterogeneidades superficiais, tendo concluído ser mais vantajoso o dispositivo Schlumberger. Para eles, os efeitos dos eletrodos de potencial sobre as curvas de resistividade aparente podem ser eliminados, ou pelo menos avaliados, quando se utiliza o arranjo Schlumberger porque, enquanto os eletrodos de potencial permanecem fixos, a influência da zona superficial onde estão encravados fica constante, ao ser aumentada a distância MN por exigência da sensibilidade do aparelho de medida, se houver efeito da zona superficial, o novo trecho da curva

não coincide com o anterior, nos pontos de espaçamento AB comum, mas conserva a mesma forma. Já no arranjo Wenner, como os eletrodos M e N são movidos em cada leitura, os saltos devido a esse efeito aparecem dissipados em toda a curva.

A Fig. 3 mostra o efeito de inomogeneidade superficial em uma curva de sondagem elétrica vertical. Na segunda posição dos eletrodos M e N , estes se encontram sobre terreno superficialmente anômalo e, por este motivo, o segundo trecho da curva não coincide com os outros, mas a curva pode ser facilmente corrigida deslocando-se para baixo o trecho irregular. Por outro lado, uma sondagem Wenner, efetuada no mesmo local, revelou um máximo fictício que pode ser confundido com presença no subsolo de uma camada resistiva.

Figura 3 – Comparação dos efeitos de eletrodos de potencial para os arranjos Wenner e Schlumberger (extraído de Kunetz, 1966, p. 53): ρ_a é resistividade aparente e a é o espaçamento dos eletrodos

Também os efeitos de eletrodos de corrente, produzidos por variação lateral de resistividade, podem ser controlados com o uso do arranjo Schlumberger desde que mantenhamos fixos os eletrodos de corrente e efetuem as medidas com diferentes espaçamentos MN .

Do exposto, pode ser concluído que as curvas de campo Schlumberger têm melhor qualidade que as de Wenner. Contudo, em 1956, Carpenter e Habberjam propuseram uma técnica de medida de diferença de potencial que permite ao dispositivo Wenner dar informações a respeito de efeitos não só superficiais mas também laterais, de um modo geral. Essa técnica, baseada no princípio de reciprocidade, é difícil de ser aplicada, na prática, com o arranjo Schlumberger, de modo que suas vantagens incidem sobre o arranjo Wenner. De acordo com tal técnica de medida, para cada espaçamento a , são feitas três leituras de resistência, R^a , R^b e R^c , com os quatro eletrodos dispostos conforme a Fig. 4 e com as respectivas resistividades dadas por:

$$\rho_a^a = 2\pi R^a, \quad \rho_a^b = 6\pi R^b, \quad \rho_a^c = 3\pi R^c \quad (20)$$

Figura 4 – Os três arranjos de eletrodos usados para a medida das resistências alfa, beta e gama: A e B são eletrodos de corrente; M e N são eletrodos de potencial

Carpenter e Habberjam (1965) mostraram que, para cada sondagem, pode ser calculada uma sequência de valores do parâmetro $C(a)$, dado por:

$$C(a) = \frac{4\rho_a^x(a) + \rho_a^x(3a)}{3\rho_a^x(a) + 2\rho_a^x(2a)} \quad C(a) = \frac{4\rho_a^x(a) + \rho_a^x(3a)}{3\rho_a^x(a) + 2\rho_a^x(2a)} \quad (21)$$

Sobre uma superfície onde a distribuição de resistividade é função só da profundidade, esse parâmetro deve ser sempre igual à unidade. Por outro lado, quando a linha de eletrodos cruza uma variação lateral de condutividade elétrica, seu valor desvia da unidade. Dessa forma, os valores de $C(a)$ diferentes da unidade indicam espaçamentos a para os quais a curva ρ_a^x é irregular. Nesses pontos, a curva deve ser suavizada para representar melhor as estruturas de camadas estratificadas horizontalmente.

Desta forma, o arranjo Wenner permite controlar as variações laterais de resistividade e contornar seus efeitos, mediante a suavização da curva ρ_a^x , visualmente.

Uma outra grande vantagem que o sistema tripotencial de medida dá ao arranjo Wenner é a possibilidade de checar as leituras feitas no campo. Quando não há erro de leitura, a Eq. (22) se verifica com pequeno erro. Caso contrário, está havendo erro de medida motivado por fuga de corrente através dos cabos que conduzem a corrente elétrica, calibração incorreta de aparelho, cabos quebrados, ou mesmo erros pessoais do operador.

$$R^x = R^y + R^z \quad (22)$$

Erros de medida do espaçamento dos eletrodos

Zohdy (1968) aponta como causa das distorções das curvas de resistividade aparente observadas fatores geológicos ou erros de medidas e analisa um erro comumente cometido, a medida incorreta do espaçamento entre os eletrodos, tendo chegado à seguinte expressão:

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{(a/b)^2 - 1}{4} \left[\frac{1}{\lambda_1(a/b) - \varepsilon_1} - \frac{1}{\lambda_1(a/b) + \varepsilon_2} - \frac{1}{\lambda_2(a/b) + \varepsilon_1} + \frac{1}{\lambda_2(a/b) - \varepsilon_2} \right] \quad (23)$$

em que ρ e ρ' são resistividades aparentes real e errada; λ_1 , λ_2 , ε_1 , ε_2 , são coeficientes dos erros cometidos na medida dos espaçamentos a e b (semidistância entre os eletrodos de corrente e de potencial, respectivamente).

A Eq. (23) mostra que os erros cometidos nos espaçamentos conduzem a um erro total na resistividade aparente que depende não só dos erros fracionais cometidos nas medidas dos espaçamentos mas também da relação a/b . Analisando aquela equação, verificamos que, quando o valor (a/b) é pequeno ($a/b = 3$ no arranjo Wenner), os erros na medida da resistividade aparente são maiores do que quando (a/b) é grande ($a/b \geq 5$ no arranjo Schlumberger).

Como esse tipo de erro é muito comum na prática, essa vantagem do arranjo Schlumberger torna-se relevante.

Aparelho de medida Na configuração Schlumberger, a distância entre os eletrodos de potencial é, em princípio, infinitamente pequena; no caso do arranjo Wenner, esse intervalo é maior e igual a um terço de AB . Consequentemente, as diferenças de potencial medidas com o arranjo Wenner são maiores e portanto mais precisas, assumindo a mesma qualidade para o potenciômetro. Entretanto a vantagem do arranjo Wenner, de requerer instrumentos menos precisos, carece de importância no momento atual, quando se dispõe de instrumento eletrônico de grande qualidade e precisão.

Profundidade de investigação A profundidade de investigação é um importante conceito físico em qualquer método geofísico de prospecção.

A princípio, a profundidade de investigação, no método de eletrorresistividade, foi confundida com profundidade de penetração da corrente, sendo admitido que uma alta porcentagem de corrente, fluindo profundamente, significaria necessariamente uma alta profundidade de investigação. Entretanto podemos ver imediatamente que essa suposição não é verdadeira, considerando um arranjo qualquer de eletrodos e seu recíproco (mesmo arranjo com a posição dos eletrodos de potencial e de corrente trocada). Embora a penetração da corrente seja diferente nos dois sistemas, a profundidade de exploração é a mesma. Por outro lado, dois sistemas com idêntica penetração de corrente podem ter diferentes profundidades de exploração. Sabe-se hoje que, dada uma certa estrutura e composição do subsolo, a penetração da corrente elétrica depende apenas da posição dos eletrodos de corrente enquanto a profundidade de investigação é função dos eletrodos de corrente e de potencial, portanto depende do arranjo escolhido.

Vários pesquisadores têm calculado a profundidade de exploração do método de eletrorresistividade, para diversos arranjos de eletrodos, considerando a terra homogênea (Roy e Apparao, 1971) ou acamadada (Evjen, 1938; Al'pin et al., 1966; Frohlich, 1967; Keller, 1970).

Achamos particularmente interessante o trabalho de Keller, no qual analisa o caso de um subsolo constituído de duas camadas, sendo a segunda eletricamente isolante. Nessa situação, muito comum na prática, a curva bilogarítmica de resistividade aparente contra o espaçamento dos eletrodos tende a uma reta ascendente, inclinada de 45°. Na Fig. 5 estão plotadas as curvas Wenner e Schlumberger, estando a grandeza a/t multiplicada por 1,38, para a curva Wenner, a fim de que sua assíntota coincida com a assíntota da curva Schlumberger.

Figura 5 — Curvas de resistividade Wenner e Schlumberger (ampliado de Keller, 1970, p. 118): ρ_a é a resistividade aparente; ρ_1 , a resistividade da primeira camada; t , a profundidade da interface; a , o espaçamento dos eletrodos (Wenner) ou semidistância dos eletrodos externos (Schlumberger)

tota da curva Schlumberger. A simples observação daquelas duas curvas mostra que elas se tornam assintóticas para:

$$\begin{aligned} \text{arranjo Schlumberger: } a/t = 2 \rightarrow \overline{AB} &= 2a \rightarrow \overline{AB} = 4t \\ \text{arranjo Wenner: } 1,38 a/t = 3 \rightarrow \overline{AB} &= 3a \rightarrow \overline{AB} = 6,6 t \end{aligned}$$

sendo t a profundidade da interface e a o espaçamento entre dois eletrodos (no arranjo Wenner) ou a semidistância entre os eletrodos externos (no arranjo Schlumberger).

Os resultados numéricos vistos permitem-nos concluir que a extensão territorial requerida para uma sondagem completa é maior no arranjo Wenner que no Schlumberger, quando o meio é constituído de duas camadas, sendo a mais profunda isolante. Consequentemente, a profundidade de exploração do arranjo Schlumberger é maior.

CONCLUSÕES Verificamos que o arranjo Schlumberger é superior ao Wenner em alguns aspectos, mas apresenta desvantagem quando olhado sob outros aspectos, conforme pode ser constatado no resumo da Tab. 1. Acreditamos,

Tabela 1 — Resumo das vantagens e desvantagens apresentadas pelos Arranjos Wenner e Schlumberger

Aspecto analisado	Melhor arranjo
Operação no campo	Schlumberger
Profundidade de investigação	"
Qualidade da curva ρ_a	"
Erros de medida do espaçamento	"
Efeitos das inhomogeneidades laterais	Wenner
Checgem das leituras	"
Precisão do aparelho	"

por conseguinte, que a escolha do melhor arranjo de eletrodos, a ser utilizado numa determinada pesquisa geoeletrica, deve ser feita levando-se em conta as condições presentes em cada caso, nunca se devendo eleger, arbitrariamente, um deles como o melhor para todos os casos.

Agradecimento Agradecemos ao geofísico Olívar Lima a leitura crítica deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- AL'PIN, L.M., BERDICHEVSKII, M.N., VEDRINTSEV, G.A. e ZAGARMISTR, A.M. — 1966 — Dipole methods for measuring earth conductivity. Transl. by G.V. Keller, New York, Consultants Bureau.
- CARPENTER, E.W. e HABBERJAM, G.M. — 1956 — A tripotential method of resistivity surveying. *Geophysics* 25:455-469.
- EVJEN, H.M. — 1938 — Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics* 3:78-95.
- FROHLICH, R.K. — 1967 — The depth penetration of dipole arrays compared with Schlumberger arrangement. *Geosurveying* 5:195-204.
- KELLER, G.V. e FRISCHKNECHT, F.C. — 1970 — Electrical methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, Oxford, pp. 114-119.

- KUNETZ, G. — 1966 — Principles of direct current resistivity prospecting. Gerruder Borntraeger, Berlin, pp. 51-53.
- ORELLANA, E. — 1972 — Prospección Geoeletrica em Corrente Continua. Paraninfo, Madrid.
- ROY, A. e APPARAO, A. — 1971 — Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36:943-957.
- DIAS, C.A. — 1974 — Apostila de métodos geofísicos elétricos. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica/UFBA, pp. 15-16.

Recebido em 14 de julho de 1982