

# Efeito da profundidade dos eletrodos em levantamentos de eletrorresistividade

Hédison K. Sato e Frederico A. F. Oliveira

CPGG/UFBA

## Abstract

The influence of electrode depths in electroresistivity survey is studied. Generally, the investigators don't care about this detail but it can introduce significant departures on the apparent resistivity values obtained with small electrode spacings. To check the influences, theoretical analysis is performed using simulated vertical electrical sounding with undergrounded Wenner array. Field data using Schlumberger array are collected to demonstrate the existence of such effects. Computed apparent resistivity values obtained with the same field array parameters, separations and depths, are successfully fitted to the field data, and a horizontally layered model is obtained. The studies with two layer models, shown that the effects of undergrounded electrodes are more expressive when the second layer is more conductive than the first one. Ambiguities arise in the reversed situations.

## Introdução

Na maioria dos casos, os dados dos levantamentos de eletrorresistividade, realizados na superfície da terra, são interpretados por diversas técnicas supondo que os eletrodos são pontuais e localizam-se em superfície. Essas hipóteses são razoáveis e melhor satisfeitas a medida em que os espaçamentos entre os eletrodos são grandes comparados à profundidade de penetração dos eletrodos. Entretanto, quando os espaçamentos não são substancialmente maiores, essa questão deve ser considerada.

Modelagens com eletrodos enterrados já existem na literatura. Mas, aparentemente, a preocupação com a profundidade do eletrodo não é o usual, exceto quando aplicados no ramo da engenharia elétrica, onde as expressões utilizadas na determinação da resistividade elétrica do solo incluem o termo profundidade dos eletrodos na expressão da resistividade aparente (Medeiros Filho, 1981).

Inúmeros trabalhos já foram feitos considerando eletrodos enterrados, usando soluções analíticas e numéricas para diversos modelos, e são utilizados em variados tipos de investigação geoeletrica. Em meios com três camadas, o trabalho de Alfano (1962) é pioneiro e analisa a execução de levantamentos com um arranjo em que um eletrodo de corrente é posicionado na base ou abaixo da primeira camada geoeletrica, e os dois de potencial na superfície, concluindo que pode-se determinar, com maior precisão, os parâmetros físicos e geométricos das camadas inferiores. Daniels (1978) apresenta a solução generalizada para um número qualquer de camadas homogêneas com os eletrodos enterrados, tanto os de corrente como os de potencial e faz estudos aplicados a perfilação elétrica de poços.

A solução generalizada de Sato (1996) se estende para a situação em que cada camada tem a sua resistividade elétrica variando continuamente com a profundidade ( $z$ ), na forma de uma função  $(1+z/p)^m$ , onde  $p$  e  $m$  são parâmetros constantes de cada camada. Eletrodos enterrados, ou melhor, submersos, foram utilizados para a investigação subaquática (Baumgartner, 1996).

Utilizando as formulações existentes, investigou-se o comportamento da resposta esperada considerando que os eletrodos são pontuais e encontram-se a profundidades compatíveis com aquelas normalmente utilizados em campanhas de eletrorresistividade. Além disso, medidas com eletrodos de enterrados a diversas profundidades foram tomadas e os valores obtidos mostram-se consistentes e coerentes com os resultantes de modelagem.

## Efeitos da profundidade

Aplicando a formulação teórica (Sato, 1996) para fontes de corrente no interior de meios com duas camadas homogêneas e isotrópicas, a resposta teórica do arranjo Wenner, considerando eletrodos pontuais e colocados a uma única profundidade, vem mostrada nas Fig. 1 e Fig. 2. Pro-

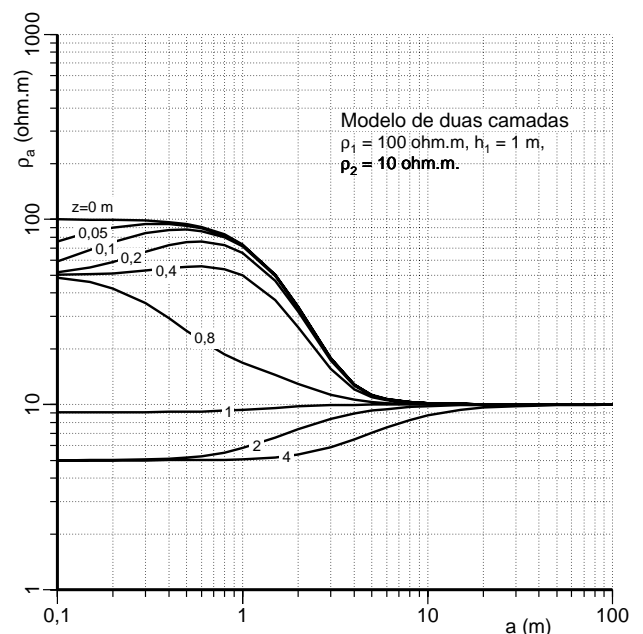


Figura 1: Arranjo Wenner com eletrodos enterrados em modelo de duas camadas horizontais, com a segunda mais condutora.

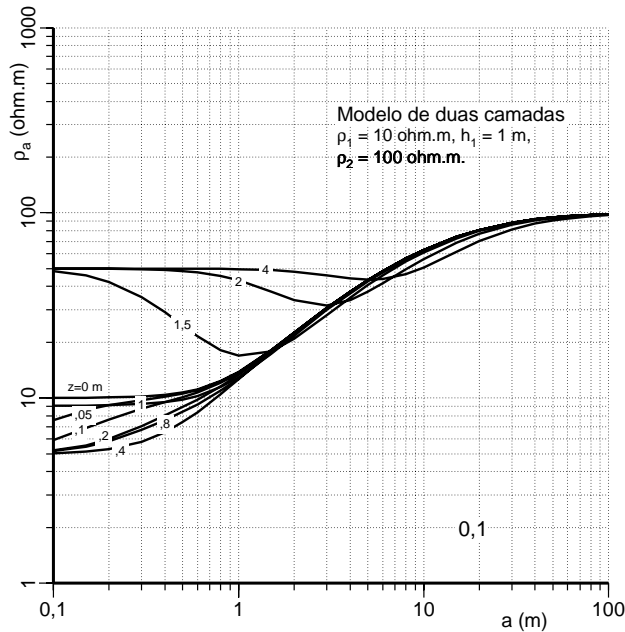


Figura 2: Arranjo Wenner com eletrodos enterrados em modelos de duas camadas horizontais, com a segunda mais resistiva.

positadamente, os valores das profundidades dos eletrodos foram variados de zero (posição superficial e clássica) até valores maiores que a espessura da primeira camada.

É interessante, então, observar que o padrão da curva de duas camadas é substituído, em alguns casos, pelo padrão de três camadas. Quando a segunda camada é mais condutora que a primeira, o padrão de três camadas aparece quando os eletrodos ainda estão no interior da primeira camada (Fig. 1). Quando a segunda camada é mais resistiva que a primeira, o padrão aparece quando os eletrodos são posicionados dentro da segunda camada (Fig. 2). Entretanto, ainda nesse caso, fortes questões de ambigüidade são aparentes, bastando verificar o quanto encontram-se próximas as curvas obtidas com  $z = 0,2$  e  $0,8$  m e, porque não, as obtidas com  $z = 0$  e  $1$  m, ou seja, as obtidas com os eletrodos tanto no topo como na base da primeira camada.

Ainda, os valores assintóticos das curvas para pequenos espaçamentos chamam atenção. Exceto quando os eletrodos são colocados na interface entre os dois meios, o valor assintótico é sempre a metade do valor da resistividade do meio em que se encontram os eletrodos, devido a definição da função resistividade aparente do arranjo Wenner ( $\rho_a = 2\pi a(\Delta V/I)$ ) ser construída considerando os eletrodos na superfície de um semi-espaço, apresentando um fator dois de diferença se a definição fosse aplicada com a expressão da fonte de corrente no espaço.

Quando os eletrodos encontram-se nas interfaces, o valor assintótico é o valor de resistividade obtido pela média harmônica das resistividades dos meios que ladeiam a interface: (i) na superfície,  $\lim_{\rho_a r \rightarrow \infty} 1/(\rho_a r^{-1} + \rho_1^{-1})$ , e (ii) na base da primeira camada,  $1/(\rho_1^{-1} + \rho_2^{-1})$ .

Considerando apenas as curvas referentes às profundidades menores que a espessura da primeira camada, a dis-

persão das interseções dessas curvas com o eixo vertical  $AB/2 = 1$  m é visualmente maior na Fig. 1 do que na Fig. 2. Isto significa que, nos casos em que a segunda camada é mais condutora que a primeira, o erro causado pelo eletrodo estar enterrado é maior. A Fig. 3 mostra o comportamento

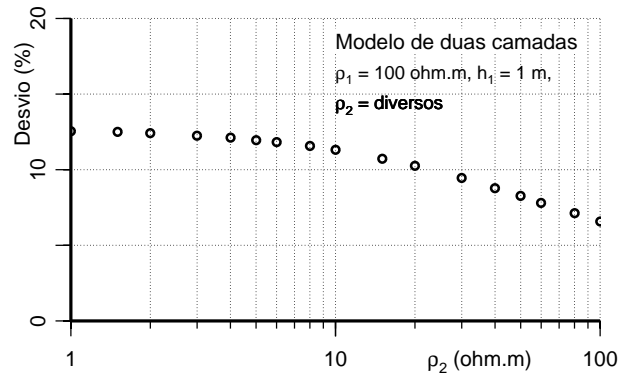


Figura 3: Desvio entre os valores das resistividades aparentes com os eletrodos na superfície e a 0,20 m, para a separação  $a=1$  m, em função da resistividade da segunda camada.

desse erro em função da resistividade da segunda camada, indicando que ele cresce com o contraste das resistividades das camadas, variando no intervalo mostrado, de 6,6 a 12,5%, comparando-se as resistividades aparentes obtidas na superfície e a 0,20 m de profundidade.

#### Dados experimentais e modelagem

Para se constatar o efeito da profundidade dos eletrodos em dados experimentais, foram realizadas sondagens elétricas dentro do Campus de Ondina da UFBA, por ser um local plano e próximo. O arranjo Schlumberger foi escolhido pois ele permite modificar seu principal parâmetro da sondagem: a distância entre os eletrodos de corrente (A e B), sem a obrigatoriedade da mudança da distância dos eletrodos de potencial (M e N), o que permite a manutenção das mesmas condições de heterogeneidades locais, porventura existente em torno dos eletrodos de potencial, com a conseqüente redução das variáveis desconhecidas.

Visando conduzir um experimento que se aproximasse das condições ideais no tocante ao eletrodo pontual, alguns procedimentos foram adotados. Os eletrodos utilizados são eletrodos metálicos comuns, cortados das tradicionais barras de aterramento elétrico, com 16 mm de diâmetro, metalizados com cobre. Para dar-lhes o caráter pontual, eles foram recobertos com fita isolante convencional, exceto 25 mm da extremidade para permitir o contato elétrico com o terreno. Secundariamente, descartou-se a utilização do procedimento comum de se molhar com água salgada, os locais de instalação dos eletrodos.

Utilizando o equipamento SYSCAL R-2 da Iris Instruments, destinado a medição de eletrorresistividade e IP, foram tomadas medidas com os eletrodos de potencial posicionados na superfície, e os de corrente posicionados a quatro profundidades: na superfície, a 5, a 10 e a 15 cm. Assim, como mostra a Fig. 4, as medidas nas quatro profundidades foram tomadas apenas para os seguintes valores de  $AB/2$ : 0,4,

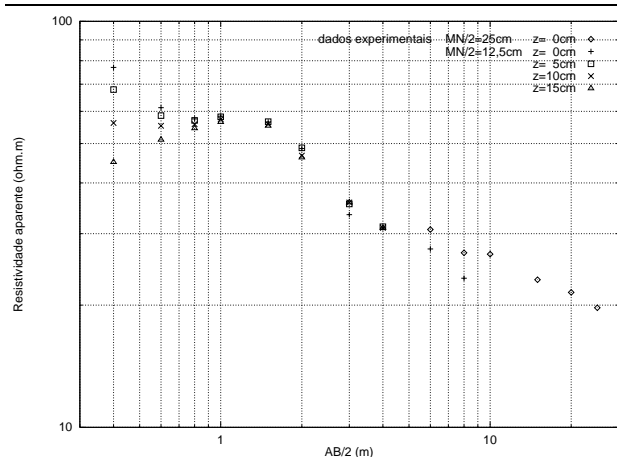


Figura 4: Dados de eletrorresistividade Schlumberger, com os eletrodos de corrente a diferentes profundidades.

0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2, 3 ou 4 m, com MN/2=12,5 cm. Adicionalmente, para a profundidade zero, foram tomadas outras medidas com MN/2=12,5 cm para os valores de AB/2: 6 ou 8 m, e com MN/2=25 cm, para os valores de AB/2: 6, 8, 10, 15, 20 e 25 m.

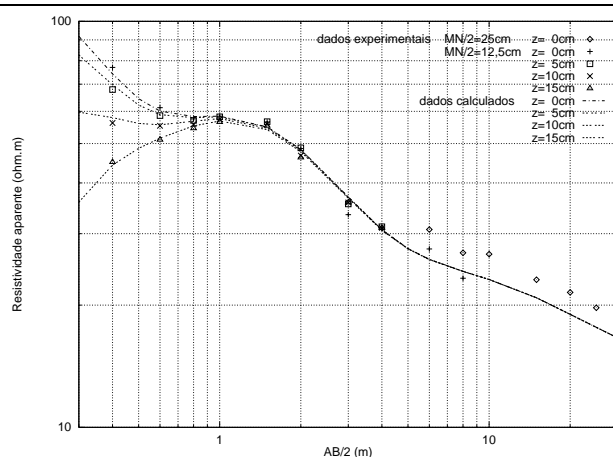
Analisando os dados obtidos nas quatro profundidades, eles mostram-se consistentes, ou seja, até o ponto em que o comportamento assintótico aproxima as medidas para além da precisão experimental, as seqüências dos valores correspondentes às quatro profundidades de eletrodos mantêm sua ordem e apresentam-se com variações típicas.

Como foram utilizados dois valores de MN/2 para as medidas com profundidade zero, suas respectivas seqüências de dados mostram-se deslocadas mas com variações similares e consistentes. Teoricamente, o deslocamento vertical das duas seqüências não pode ser creditado aos diferentes valores de MN/2, e, isso sim, atribui-se às heterogeneidades laterais locais, provavelmente induzidas pela vegetação rasteira.

A Fig. 5 mostra os dados experimentais, os dados calculados e modelo geoeletrico correspondente, obtido por meio de modelagens diretas sucessivas e comparação visual com os dados experimentais. Nas comparações, dois aspectos foram considerados: (i) sobreposição das curvas teóricas a todos os dados coletados com MN/2=12,5 cm, e (ii) um comportamento da curva teórica para AB/2 > 8 m, paralelo à seqüência dos pontos correspondentes aos dados experimentais obtidos para MN/2=25 cm. Em todos os casos, os cálculos foram feitos considerando que os eletrodos M e N encontram-se na superfície. Embora a Fig. 5 não mostre, vale dizer que, no caso em que as profundidades dos eletrodos A e B são diferentes das dos eletrodos M e N, todas as curvas teóricas tendem para zero quando AB/2 tende a zero.

**Conclusões**

Este estudo mostra que, nos trabalhos de campo, certos cuidados devem ser tomados com relação a profundidade dos eletrodos comparado ao espaçamento entre eles. Certos fatores simultâneos podem levar, com freqüência, a es-



Camada	Resistividade (ohm.m)	Prof. base (m)
1	128	0,14
2	39	0,40
3	115	0,78
4	24	9,0
5	14	

Figura 5: Dados experimentais e os dados calculados.

sa situação, por exemplo levantamentos em terrenos inconsistentes e secos que permitem fincar, com facilidade, os eletrodos, e a alta resistência de contato cuja solução provoca, geralmente, a colocação de eletrodos mais enterrados. Além disso, a utilização de eletrodos a profundidades variadas nas medidas feitas com os menores espaçamentos poderá introduzir variações de resistividade aparente, inconsistentes a primeira vista.

Como as soluções teóricas existentes, para modelos de camadas, já consideram a profundidade da fonte de corrente e do local da observação do potencial elétrico, não é demais passar-se a usar uma formulação mais generalizada, seja da modelagem direta, seja em problemas de inversão.

Entretanto, em geral, os eletrodos metálicos não são parcialmente isolados como foram os utilizados para a coleta dos nossos dados experimentais. Isso significa que a fonte de corrente não é pontual, está distribuída ao longo de um segmento, provavelmente com densidade de corrente variando ao longo do seu comprimento, dificultando a modelagem.

**Agradecimentos**

H. K. Sato agradece ao CNPq pelo apoio na forma de Bolsas de Pesquisa. F. A. F. Oliveira, ao CNPq/PIBIC/UFBA pela bolsa de Iniciação Científica. Além disso, os autores agradecem ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG-UFBA) pelo apoio a este trabalho, bem como ao Prof. Olivar A. L. Lima pela revisão deste resumo.

**Referências**

Alfano, L. (1962) *Geoelectrical prospecting with underground electrodes*, *Geophysical Prospecting*, **10**:290-303.  
 Baumgartner, F. (1996) *A new method for geoelectrical investigations underwater*, *Geophysical Prospecting*,

44:71–98.

Daniels, J. J. (1978) Interpretation of buried electrode resistivity data using a layered earth model, *Geophysics*, **43**:988–1001.

Medeiros Filho, S. (1981) *Fundamentos de medidas elétricas*, Editora Guanabara.

Sato, H. K. (1996) *Fonte de corrente elétrica no interior de camadas horizontais cujas condutividades variam potencialmente com a profundidade*, Tese de Doutorado, Univ. Federal da Bahia.