



## Utilização de uma metodologia inovadora para interpretação de dados de sondagem elétrica vertical (SEV) visando investigação profunda na Bacia do Paraná, porção oeste do Estado de São Paulo

Oleg Bokhonok (IAG-USP & IPECI/UNISANTOS), Otávio Coaracy Brasil Gandolfo (IPT & IPECI/UNISANTOS), Antonio Celso de Oliveira Braga (IGCE/UNESP), Jorge Luís Porsani(IAG-USP), Cassiano Antonio Bortolozo (IAG-USP), Liliana Alcazar Diogo (IAG/USP)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

A new methodology for processing vertical electrical sounding (VES) is presented. The field data, acquired in eighties, consists of VES with a long AB length, acquired at the Paraná Sedimentary Basin, in the western portion of the State of São Paulo, for oil and gas prospecting purposes. The Residual Function Dispersion Maps (RFDM) was obtained. Analysis of these maps allowed the construction of the geoelectric model in subsurface and the understanding about the relative ambiguity of the parameters. Further improvements for data analysis and interpretation can be achieved at the time when seismic data acquired in Paraná Basin will be available.

Keywords: VES, Residual Function Dispersion Map, Inversion, Barcia do Paraná

### Introdução

A inversão dos dados geofísicos para caracterização geoeétrica do meio geológico é um grande desafio, pois lida com problemas de otimização não lineares, multidimensionais e multimodais. Sendo assim, esse tipo de problema exige uma análise de ambiguidade relativa dos parâmetros do modelo, entendimento se todos os parâmetros podem ser determinados e só na base dessas informações já fazer a escolha de um algoritmo ou então a estratégia de otimização apropriada. Por tanto, é necessário obter a informação sobre o número, posição, distribuição e tamanho de mínimo e/ou máximo de função, ou seja, obter o conhecimento sobre a topografia da função objetivo. A forma convencional para obter a topografia da função objetivo é através dos mapas de função residual (*Residual Function Maps - RFM*) ((Menke, 1989, Larson, 1999, Kurt, 2007).

Apesar de amplo uso dessa metodologia para investigar problemas de inversão multidimensionais, este tipo de procedimento funciona bem apenas nos casos quando o problema inverso possui duas incógnitas. Para problemas multidimensionais, muito frequentes em geofísica aplicada, essa análise fornece informações errôneas sobre a topografia da função, por não permitir observar seu comportamento global, uma vez que são observadas

fatias (seções transversais) da função, ou seja, observa-se apenas a variação de dois parâmetros enquanto os outros parâmetros são fixados em seus valores corretos. Além disso a geração destes mapas para modelos com mais de dois parâmetros não é possível para os dados reais, pois requer conhecimento obrigatório de valores exatos dos parâmetros a ser fixados. Para superar as limitações da metodologia convencional usada para construir os mapas de função residual, foi usada uma estratégia alternativa idealizada por Bokhonok et al. (2015). Esse método baseia-se na análise da dispersão dos resultados de milhares de inversões individuais. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, parâmetro versus parâmetro. Porém os pontos refletem modelos que não possuem os demais parâmetros fixados. Pontos próximos no gráfico de parâmetro versus parâmetro não necessariamente possuem os demais parâmetros semelhantes. O método RFDM (Residual Function Dispersion Maps) dessa forma possibilita de uma maneira mais elaborada diferenciar a ambiguidade global de mínimos locais. Neste trabalho foram obtidos os mapas residuais de função objetivo de dados reais usando como exemplo uma sondagem elétrica vertical (SEV) adquirida na Bacia Sedimentar do Paraná na porção oeste de Estado de São Paulo. Análise destes mapas permitiu além de construção do modelo geoeétrico em subsuperfície, obter o entendimento sobre a ambiguidade relativa dos parâmetros.

### Geologia

O local onde foi realizada a SEV apresentada neste trabalho encontra-se sobre sedimentos do Grupo Bauru, que ocorre em grande parte do Estado de São Paulo, sendo formado pelas Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Assenta-se diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral podendo, localmente repousar sobre sedimentos das Formações Botucatu e Pirambóia. Nas diversas formações do Grupo Bauru predominantemente ocorre arenitos finos a muito finos, normalmente maciços, estratos de lamitos siltosos e intercalações de argilitos.

## Materiais e métodos

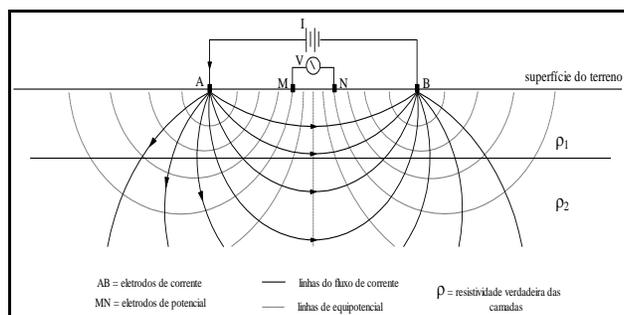
Esse trabalho foi desenvolvido utilizando uma sondagem elétrica vertical profunda que foi realizada na década de 80, nas proximidades da cidade de Bauru, região oeste da cidade de São Paulo, dentro de um programa de exploração do consórcio IPT/CESP (Paulipetro). A campanha tinha por objetivo a caracterização da estratigrafia da Bacia Sedimentar do Paraná, no Estado de São Paulo, para fins de prospecção de estrutura favoráveis à ocorrência de petróleo e gás natural. Resultados da interpretação de diversas SEVs realizadas nesta ocasião, gerando mapas temáticos com modelos de isópacas e contornos estruturais das formações Serra Geral e Botucatu, inclusive do embasamento cristalino, podem ser encontrados em Braga et al. (2016a).

## Técnica da sondagem elétrica vertical

O propósito de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV), método da eletrorresistividade, é determinar com a base na curva de resistividade aparente adquirida no campo, a distribuição vertical da resistividade sob o ponto sondagem.

Na maioria dos casos, trata-se encontrar um modelo de camadas horizontais e paralelas com os respectivos valores de resistividade que explica a curva obtida no campo usando a informação a priori sobre a geologia local. Ou seja, resolver o problema inverso.

A SEV foi adquirida utilizando o arranjo Schlumberger que consiste na obtenção de diversas medidas de resistividade, mantendo uma separação crescente entre eletrodos de emissão de corrente (AB), permanecendo fixo o dipolo de leitura do potencial elétrico (MN), posicionados simetricamente em relação a um ponto central do arranjo (Figura 1).



**Figura 1** - Técnica da técnica sondagem elétrica vertical, arranjo Schlumberger.

Este tipo de ensaio é muito utilizado em estudos rasos aplicados à Geologia de Engenharia, Ambiental, Hidrogeologia, assim como para estudos profundos de cunho acadêmico ou aplicados à Geologia de Petróleo (Braga , 2016b).

## Problema Direto

A primeira formulação a usar filtros lineares para resolver o problema direto de eletrorresistividade é creditada a Ghosh (1971a, 1971b). Esse método consiste em resolver a integral da função de resistividade aparente por um convolução de uma função transformada da resistividade com uma função filtro. A função transformada da resistividade é calculada para cada modelo e então é convolvida com um conjunto de valores de filtro previamente calculados. No trabalho de Johansen (1975) o autor aprimora a técnica usando um conjunto de filtro maior, dessa forma aumentando significativamente a precisão do calculo. Nesse trabalho usaremos a formulação e os filtros desenvolvidos por Johansen (1975).

## Função Objetivo

As funções objetivo utilizadas nesse trabalho também são de norma quadrática sem regularizações, normalizada pelo número de dados (Equação 1). Dessa forma  $\vec{d}$  são os dados sintéticos do modelo descrito acima e  $h(\mathbf{p})$  os valores calculados usando os parâmetros obtidos no processo de inversão.

$$\phi(\vec{d}, \mathbf{p}) = \|\vec{d} - h(\mathbf{p})\| / Np \quad (1)$$

## Residual Function Dispersion Map (RFDM)

A metodologia baseia-se na análise da dispersão resultados obtidos a partir de várias execuções (multi-start), de um algoritmo de otimização heurístico baseado em simplex sem limitação de espaço de busca. Os parâmetros invertidos são representados em mapas bidimensionais, sem fixar outros parâmetros do modelo. A análise da dispersão das soluções é feita no formato de mapa, onde a terceira dimensão é representada pelo valor de erro em escala de cores.

## Resultados

Análise de *Residual Function Dispersion Maps* permitiu revelar a complexidade da topografia de funções objetivos resultantes de dados reais de SEV. A seguir serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa em andamento. Nas figuras de 2 à 6 estão os resultados de primeira à quinta camada de modelo. As cores dos pontos apresentados em forma de dispersão nos gráficos mostram o RMS obtido com SEV em questão, sendo os pontos pretos os menores valores de RMS, inferior a 0,52%.

## Discussão e Conclusões

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT e ao Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP pela disponibilização do dado utilizado neste trabalho.

Bokhonok O. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Pós-doutorado (Processo: 159293/2015-4).

Bokhonok O., Porsani J.L., Diogo L.A. e Bortolozo C.A. agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte por meio de projeto PVE

### Referencias

#### Bokhonok et al. (2015)

Braga, A. C. O.; Dourado, J. C.; Birelli, C. A.; Blanco, R. G.; Francisco, R. F. 2016a. Geofísica aplicada no controle estrutural na área do Domo de Piratininga (SP). Revista Geociências (UNESP), São Paulo, v.35, n.4, p. 598-608.

Braga, A. C. O. 2016b. Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia. Editora Oficina de Textos. 159p.

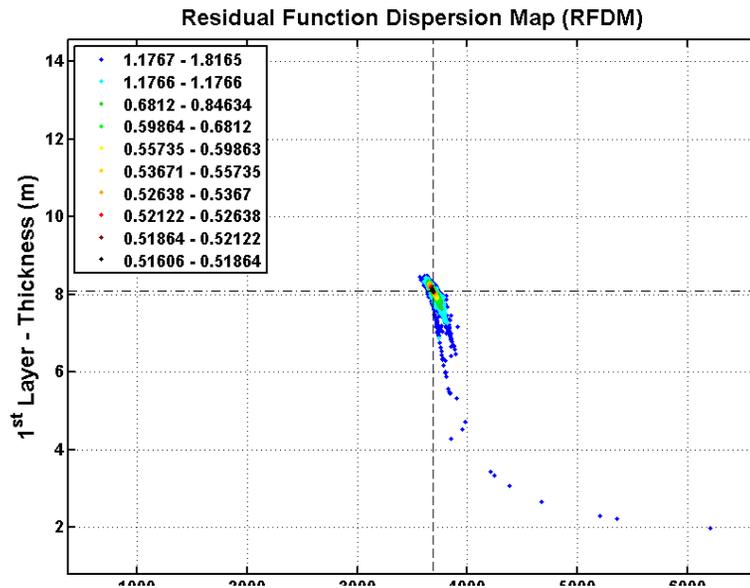
#### Ghosh (1971a, 1971b)

#### Johansen (1975)

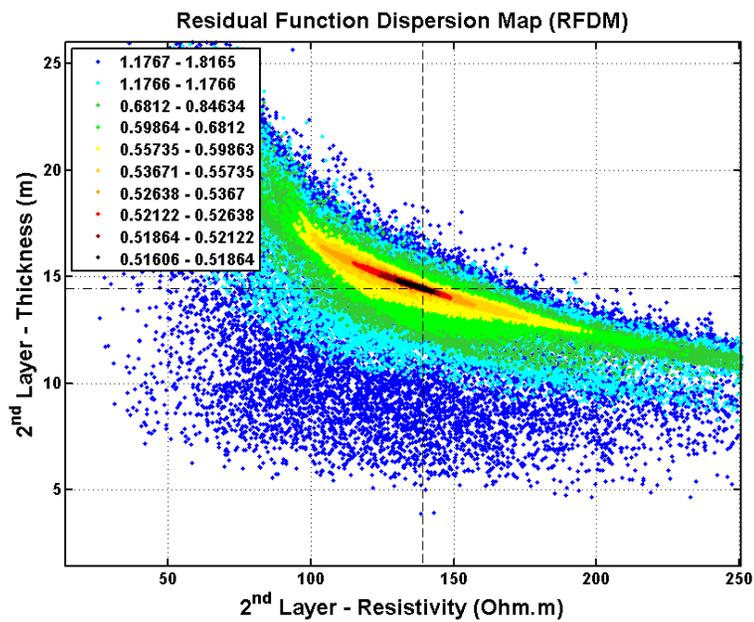
#### Kurt, 2007

#### Larson, 1999,

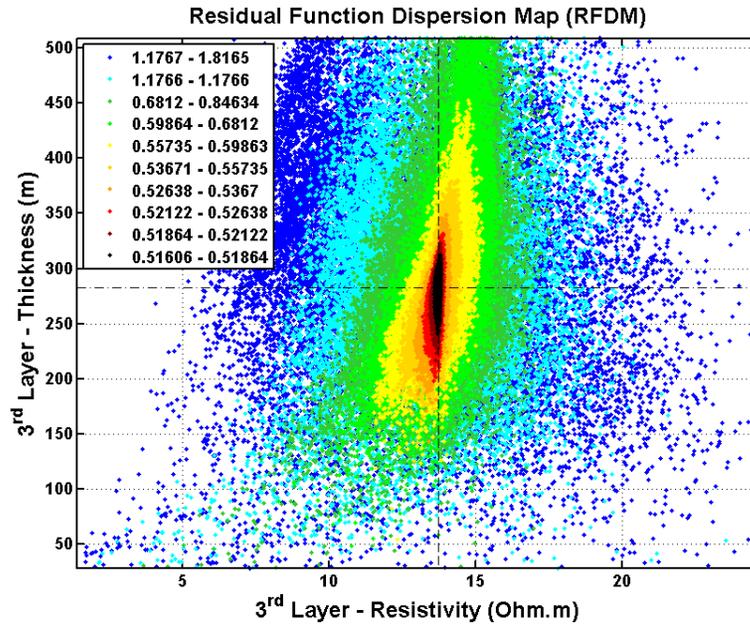
Menke, W. 1989. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. 1st Edition, Academic Press, San Diego, 289.



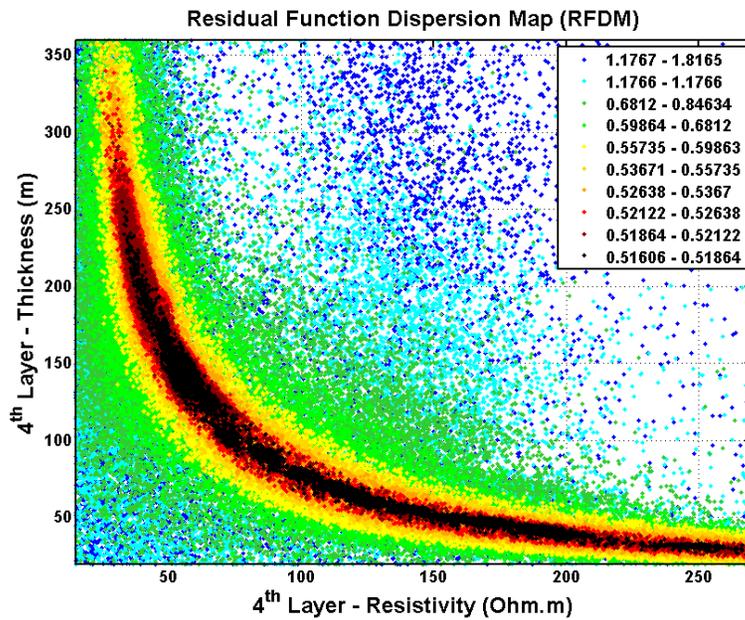
**Figura 2** - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de primeira camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.



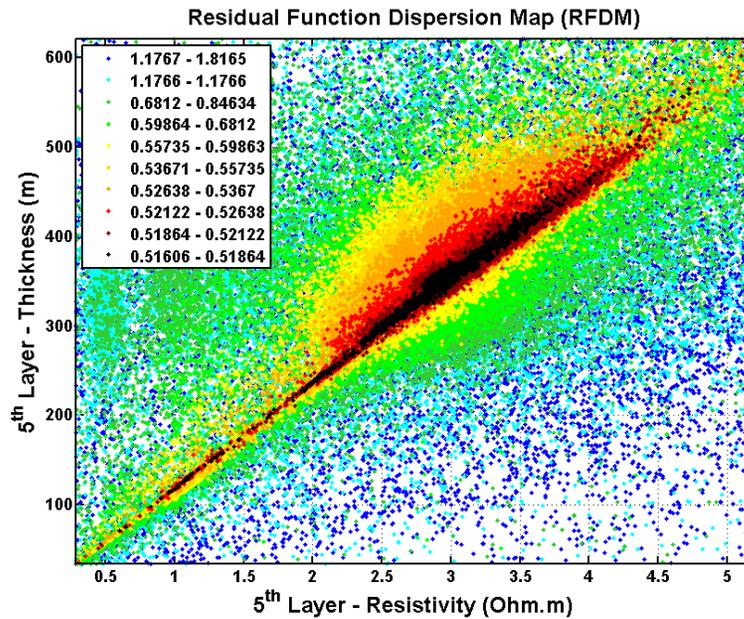
**Figura 3** - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de segunda camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.



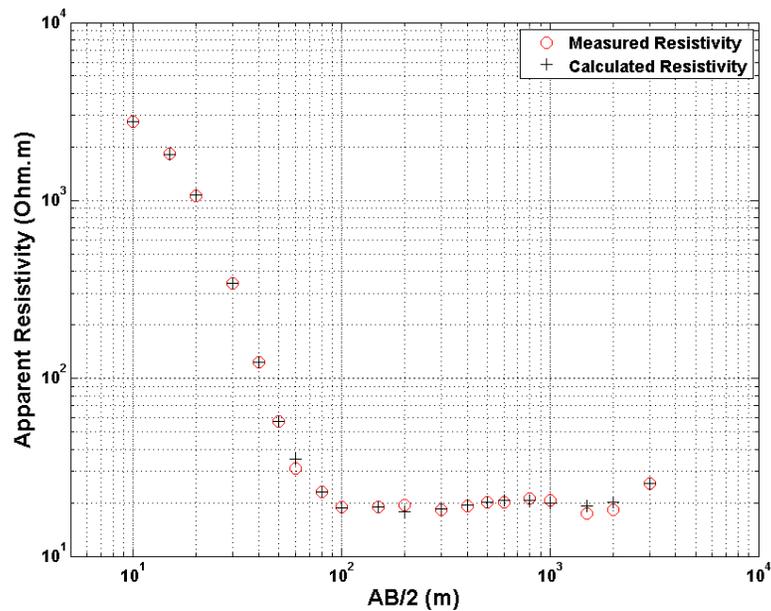
**Figura 4** - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de terceira camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.



**Figura 5** - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de quarta camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.



**Figura 6** - Resultados obtidos pelo método RFDM para os parâmetros de quinta camada do modelo. As linhas pretas tracejadas indicam os valores de mediana de dispersão que amostra o mínimo global.



**Figura 7** – A curva de SEV real (cruz de cor preto) versus curva calculada (círculo de cor vermelho). O ajuste apresentou erro RMS de 0.52.