

Desenvolvimentos no processamento de dados eletromagnéticos obtidos com o protótipo de um sistema indutivo a multi-frequência aplicado a campos de petróleo

Marcos Vitor Barbosa Machado (*), Petrobras (RH/UP/ECTEP), Carlos Alberto Dias, LENEP/UENF, Hédison Kiuity Sato, CPGG/UFBA

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

This work consists of an analytical study on the fundamentals of the multi-frequency electromagnetic method, tested with Recôncavo Basin oil fields data. We show the inversion process of the measurements obtained with a multi-frequency inductive system prototype using the radial component of the measured magnetic field considering the finite geometry of the transmitting source. In addition, a new function is deduced and used for construction of the geoelectric sections of petrophysical parameters, obtained from the measurements and tested on field data. This new advances show consistency and bring improvements to the data interpretation present stage.

Introdução

Atualmente, dispõe-se, no LENEP/UENF (Macaé-RJ, Brasil), de um sistema eletromagnético indutivo de quinta geração. A patente do método pertence a C. A. Dias e ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (Dias & BNDE, 1973) e o sistema efetua medidas em varredura sobre 54 valores de frequência no intervalo entre 1 Hz e 10 kHz, com capacidade de operar com separação transmissor-receptor (T-R) de até 3,5 km. A grandeza física medida é o campo magnético radial gerado por uma *loop* de corrente horizontal, de forma

quadrada, estendida sobre a superfície terrestre, com lado variando entre 200 a 600 m. A opção pela medida da componente radial do campo magnético reside no fato desta componente nascer integralmente das correntes induzidas no meio condutor. A Figura 1 mostra o transmissor e o receptor do sistema em operação durante levantamento sobre um campo produtor de petróleo na Bacia do Recôncavo-BA, Brasil.

Os parâmetros medidos são as amplitudes da componente em fase e em quadratura do sinal, normalizadas para o seu valor no espaço livre. Estas funções são invertidas para os valores dos parâmetros elétricos de um semi-espaço homogêneo equivalente, descrito através da sua resistividade aparente (módulo) e o parâmetro de polarização (dado pelo quociente da parte imaginária da condutividade aparente, σ_A , e o seu módulo).

No procedimento de inversão proposto por Dias (1968), a fonte é considerada ser um dipolo magnético vertical. Esta aproximação traz restrições quanto à distância T-R a ser adotada no levantamento. Segundo Machado e Dias (2007), para aproximar uma *loop* quadrada para um dipolo magnético, a distância T-R a ser adotada deve ser, no mínimo, 6 vezes o lado do quadrado. Essa condição traz limitações para o experimento, vez que restringe o tamanho do lado do transmissor e a mínima distância T-R a ser adotada.

Não obstante as limitações pela adoção da solução dipolar, foi realizado um experimento em campo produtor de petróleo, localizado na Bacia do Recôncavo, onde se tomou o cuidado em adotar distâncias T-R adequadas para a utilização da solução da fonte dipolar (Dias *et al.*, 2007). Entretanto, para levantamentos que estão sendo conduzidos em campos produtores no norte do estado do Espírito Santo (Brasil), em função da profundidade do



Figura 1: Transmissor (T) e receptor (R) do 5º protótipo do sistema EM a multi-frequência

alvo, tornou-se necessário trabalhar com valores de comprimento do lado do transmissor e separações T-R que impedem a aproximação da fonte para um dipolo magnético vertical. Desta forma, é obrigatória a utilização de solução de fonte finita para o processamento desses dados.

Outro aspecto sobre o processamento dos dados, diz respeito ao processo de construção das seções geo-elétricas com os parâmetros petrofísicos obtidos com a inversão do sinal medido. A idéia é associar o valor dos parâmetros elétricos determinados na posição do receptor, na superfície terrestre, ao ponto da sub-superfície coincidente com o centro da zona de máxima contribuição para o sinal medido.

No procedimento de processamento anterior a este trabalho (Dias, 1968; Sato, 1979), o ponto da sub-superfície (x,y) de máxima contribuição vinha determinado através de duas características: pertencer ao lugar geométrico dos pontos com a profundidade igual a uma fração (η) do *skin depth* vertical (δ_d) do campo elétrico (profundidade, para a qual, cai a $1/e$ o valor do campo elétrico da superfície no ponto verticalmente correspondente), para uma fonte dipolar magnética vertical, e, ainda, guardar a menor distância ao receptor, conforme Figura 2. A intuição associada a esta idéia baseia-se em dois argumentos: (a) que, para um sinal gerado por fonte de transmissão contínua, situada na superfície terrestre, o sinal-resposta dos pontos da superfície terrestre é nulo e do espaço abaixo da profundidade do *skin depth* vertical do campo elétrico torna-se irrelevante; e no caso de fazer correspondência da medida ao efeito devido majoritariamente a uma zona da sub-superfície, a mais provável posição do centro desta zona principal corresponda a um ponto pertencente ao lugar geométrico igual a uma fração do *skin depth*; (b) com base na idéia explicitada em (a), busca-se o ponto de máxima contribuição, coincidente com o ponto geometricamente mais próximo do receptor.

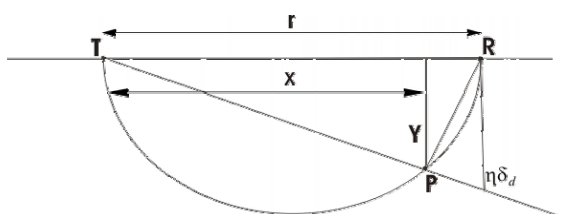


Figura 2: Ponto P da sub-superfície ao qual se associam os valores dos parâmetros extraídos da medida realizada no receptor R

O procedimento descrito no parágrafo anterior se mostrou eficiente no trato com dados de campo, resultando em seções geo-elétricas coerentes e consistentes, inclusive invariantes por mudança de posição do transmissor e do receptor (Dias *et al.*, 2007). No entanto, essas idéias necessitavam de uma demonstração analítica definitiva.

O trabalho de Machado e Dias (Machado, 2009; Machado e Dias, 2009) confirmou analiticamente a existência de uma zona do semi-espaço condutor de

maior influência nas medidas (*zona principal*), no domínio da frequência, realizadas para uma configuração de T-R, com ambos sistemas na superfície terrestre, e dado valor de frequência, usando-se transmissor de dimensão finita, circular, e medindo-se a componente radial do campo magnético. Assim, justificou-se analiticamente o procedimento que associa a um ponto interior do semi-espaço condutor os valores dos parâmetros elétricos determinados para um semi-espaço homogêneo equivalente construído a partir da medida do campo magnético radial na superfície para uma dada configuração T-R e valor de frequência. Foi possível introduzir, ainda, um termo de correção na função utilizada no procedimento antigo. A esta nova função gerada chamaremos de função Machado e Dias.

Ábacos de inversão

Para inversão dos dados foram implementadas soluções da componente radial do campo magnético geradas por *loops* circulares com raio R_T para diferentes valores de separação T-R (r) , de acordo com a posição das estações de medição e do centro da "loop" transmissora. Com isso, para cada estação, tem-se um novo valor de r/R_T , e, em decorrência, um ábaco específico para processar os dados de cada estação.

Como a geometria da fonte utilizada é quadrada, o uso da aproximação dipolar pode trazer erros na determinação dos parâmetros elétricos caso o valor de r não seja suficientemente grande comparado com R_T . Isso acontece quando a razão r/R_T é menor do que 12 (Machado e Dias, 2007), como pode ser observado na Figura 3, onde, por exemplo, $r/R_T = 3$. Para esta situação, pode-se considerar, com erro bem menor, a aproximação da geometria quadrada para a geometria circular e utilizar o ábaco da Figura 4 para obtenção dos dados petrofísicos a partir dos valores em-fase e em-quadratura do sinal medido. Notar que R_T é igual à metade do lado do quadrado.

Função usada na construção de seções geo-elétricas

Uma vez determinados os parâmetros petrofísicos a partir das medidas de campo, inicia-se a etapa de construção das seções geo-elétricas. Para isso, utiliza-se a função proposta por Machado e Dias (Machado, 2009) que atribui ao centro da zona principal os valores das propriedades elétricas determinadas. Esta função foi construída, preservando os parâmetros da função utilizada no procedimento antigo de processamento definida por Dias e Sato (Sato, 1979). Como forma de estabelecer uma comparação entre estas funções, a nova função (equações 1 e 2) foi construída acrescentando-se um termo de correção à primeira, que é justamente o termo entre parênteses multiplicando a exponencial nas equações 1 e 2, a seguir

$$a = x/r = \frac{1}{1 + (\eta\delta_d/r)^2} + \left(\eta \frac{\delta_d}{r} - p_1 \right) e^{-\theta/s_1} \quad (1)$$

$$b = y/r = \frac{\eta\delta_d/r}{1 + (\eta\delta_d/r)^2} + \left(\eta \frac{\delta_d}{r} q_2 - p_2 \right) e^{-\theta/s_2} \quad (2)$$

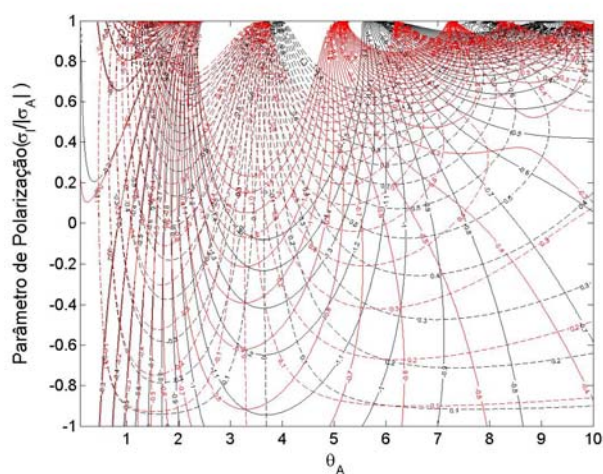


Figura 3: Ábaco para $r = 3 R_T$: amplitude em-fase de H_r (contínuo), amplitude em-quadratura (tracejado) para dipolo magnético vertical (em vermelho) e *loop* quadrada (em preto)

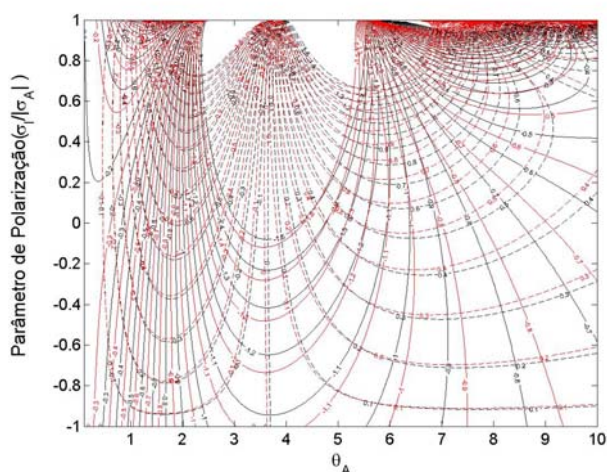


Figura 4: Ábaco para $r = 3 R_T$: amplitude em-fase de H_r (contínuo), amplitude em-quadratura (tracejado) para *loop* circular (em vermelho) e *loop* quadrada (em preto)

onde η , p_1 , g_1 , q_2 , p_2 e g_2 são coeficientes obtidos com o ajuste em relação aos pontos que representam o centro da zona de máxima contribuição para o sinal medido. A Figura 5 traz comparativamente os pontos que representam as coordenadas do centro da zona principal comparados com as coordenadas (curvas contínuas) do ponto de atribuição geradas segundo o método de processamento antigo. De uma curva para outra, varia-se o chamado parâmetro de calibração (η), fração que multiplica a *skin depth* vertical do campo de dipolo.

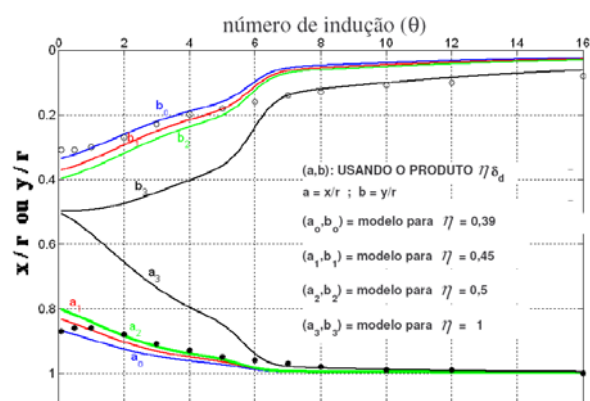


Figura 5: Comportamento das coordenadas ($a = x/r$ e $b = y/r$) da zona principal, com círculos vazios para x/r e cheios para y/r

Resultados e desenvolvimentos futuros

Nesta seção, a Figura 6 (a, b, c, d, e, f) e 7 (a, b, c, d, e, f) mostram as imagens resultantes do processamento de dados obtidos em um campo continental produtor da Bacia do Recôncavo (Bahia, Brasil) a partir das duas propriedades elétricas, resistividade aparente e parâmetro de polarização, para duas linhas, 400 e 800.

As Figuras 6 (a,b) e 7 (a,b) foram processadas utilizando o procedimento antigo: solução dipolar e função de construção de seções de Dias e Sato. Algumas modificações surgem ao adotar a nova função de construção de seções nas Figuras 6 (c, d) e 7 (c,d), mas as diferenças são muito sutis uma vez que a nova função, dentro do intervalo das condições nas quais este experimento foi realizado, possui comportamento muito próximo da função usada anteriormente com o parâmetro de calibração igual a 0,4.

As Figuras 6 (e,f) e 7 (e,f) foram geradas com a nova abordagem de processamento, de forma completa: ábacos com solução de fonte finita e função de atribuição de Machado e Dias.

Nestes exemplos, não se podem notar grandes modificações em função das novas mudanças no procedimento de processamento dos dados, vez que as razões R_T/r adotadas no experimento respeitaram quase sempre o limite para adoção da solução dipolar.

Como etapa futura, pretende-se inserir no procedimento de inversão uma função que verificará se os dados obtidos violam as condições da aproximação *quasi*-estática, considerada no cálculo dos ábacos de inversão e na geração da função para construção das pseudo-seções. Esta função será baseada na Figura 8 a seguir, que traz os limites inferior e superior da condição *quasi*-estática para um transmissor de 300 m de raio, por exemplo.

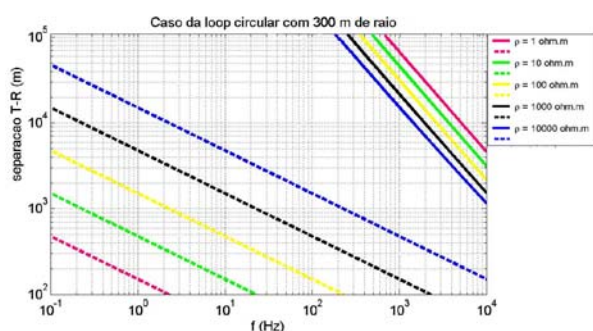


Figura 8: Limites inferior (tracejado) e superior (contínuo) de validade da aproximação quasi-estática para transmissor circular com 300 m de raio, na superfície de um semi-espaço condutor homogêneo

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo mostrar a evolução no processamento dos dados obtido com o EM a multi-frequência, que tem despontado no País como eficiente no monitoramento da produção de fluidos em reservatórios continentais.

Os principais pontos destacados são:

(a) adoção da solução de fonte circular finita para inversão das partes (em fase e quadratura) da componente radial do campo magnético medido, em substituição à solução de aproximação da fonte finita por fonte dipolar pontual magnética;

(b) aplicação da nova função, gerada a partir da localização dos pontos centrais das zonas de máxima contribuição, na construção de seções de resistividade elétrica aparente e polarização elétrica induzida aparente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LENEP/UENF, pela infraestrutura disponibilizada, e à PETROBRAS que, através do programa de Redes Temáticas, financia a pesquisa para desenvolvimento do método EM à multi-frequência.

Referências

- Dias, C. A.**, 1968. A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity. Ph. D. Thesis, Univ. California – Berkeley, USA, 260 pp.
- Dias, C. A. & BNDE**, 1973. Non-grounded method of geophysical exploration. Patent n° 920.660, Issued Feb. 6, 1973, Class 324-9 C.R.C. 1, Filed May 31, 1971, Ottawa, Canada.
- Dias, C. A., de Lima, O. A. L., Sato, H. K., Moraes, J. A. C.**, 2007, Hydrocarbon detection and reservoir imaging during enhanced oil recovery using an inductive EM multi-frequency method. Proceedings of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro-RJ, paper #233, v. 1. p. 7-11.
- Machado, M. V. B.**, 2009, Estudo analítico sobre o método eletromagnético a multi-freqüência, com vistas à sua aplicação na área de E&P de petróleo. Tese de doutorado (a ser defendida em 2009), LENEP/UENF, Macaé-RJ.
- Machado, M. V. B. & Dias, C. A.**, 2007, Dedução e análise dos campos elétrico e magnético gerados por transmissor quadrado de um sistema geofísico eletromagnético a multi-freqüência. Proceedings of the 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro-RJ, paper #227, v. 1. p. 12-17.
- Machado, M. V. B. & Dias, C. A.**, 2009, Determinação da zona do semi-espaço condutor de maior influência para medidas realizadas com sistema eletromagnético a multi-freqüência. No prelo para 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador-BA.
- Sato, H. K.**, 1979. Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema eletromagnético a multi-freqüência. Dissertação de mestrado, UFBA, Salvador-BA, 98pp.

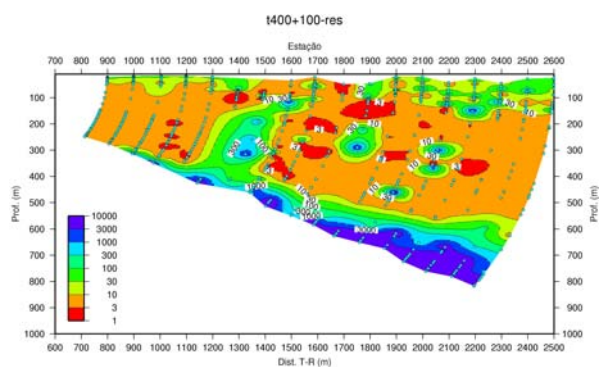


Figura 6a: Seção de resistividade aparente processada com a solução dipolar e função Dias e Sato (Sato, 1979). Linha 400 com T na estação +100.

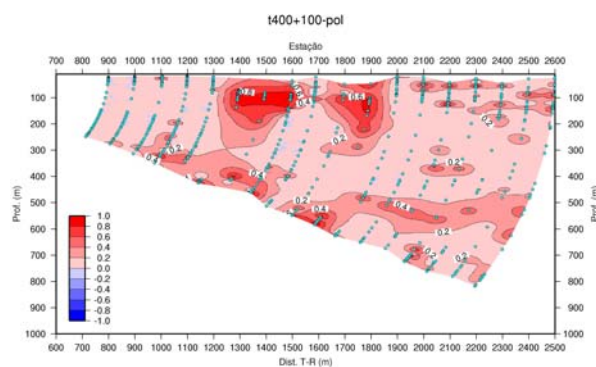


Figura 6b: Seção de polarização induzida processada com a solução dipolar e função Dias e Sato (Sato, 1979). Linha 400 com T na estação +100.

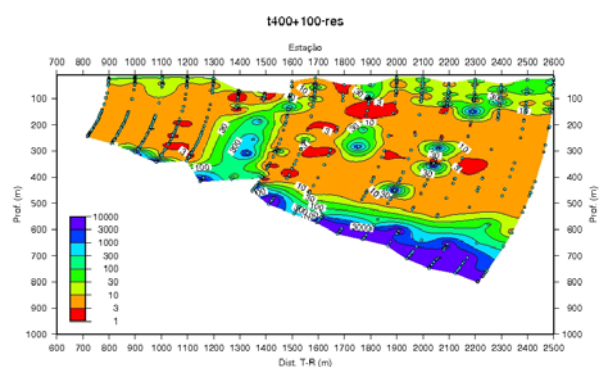


Figura 6c: Seção (6a) de resistividade aparente processada com a solução dipolar e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 400 com T na estação +100.

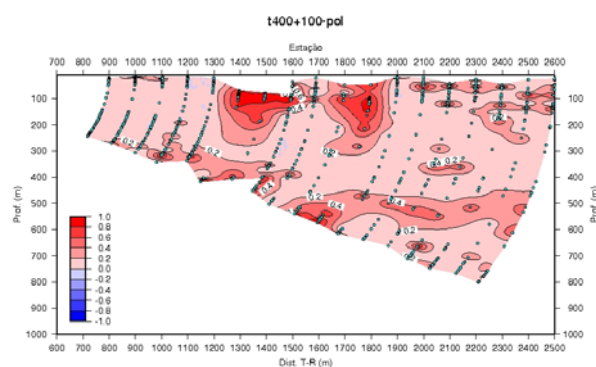


Figura 6d: Seção (6b) de polarização induzida processada com a solução dipolar e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 400 com T na estação +100.

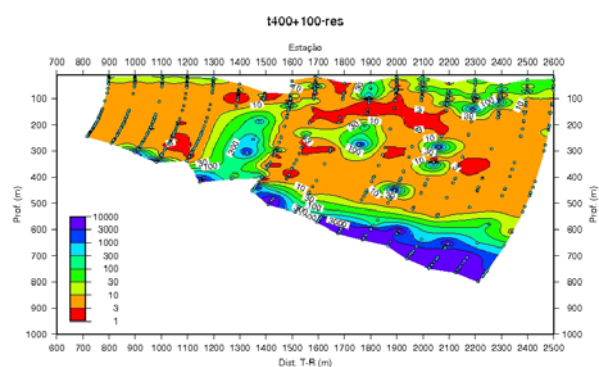


Figura 6e: Seção (6a) de resistividade aparente processada com a solução de fonte circular e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 400 com T na estação +100.

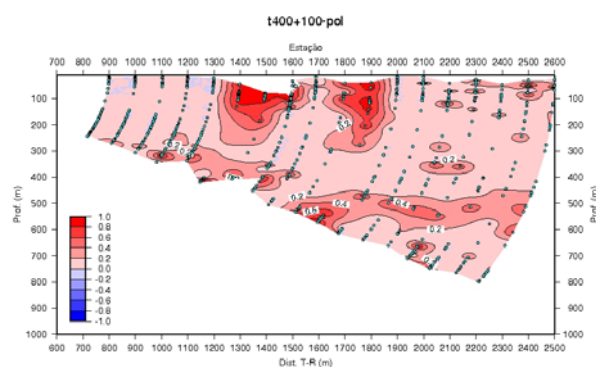


Figura 6f: Seção (6b) de polarização induzida processada com a solução de fonte circular e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 400 com T na estação +100.

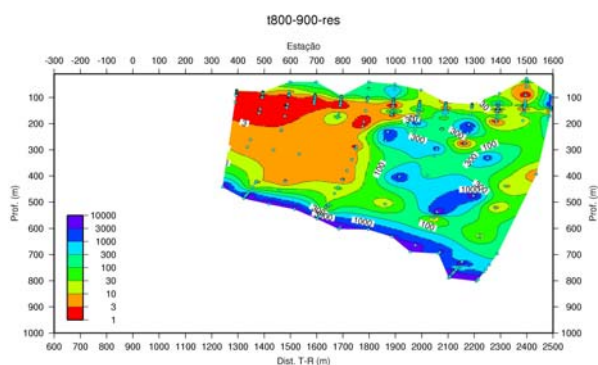


Figura 7a: Seção de resistividade aparente processada com a solução dipolar e função Dias e Sato (Sato, 1979). Linha 800 com T na estação -900.

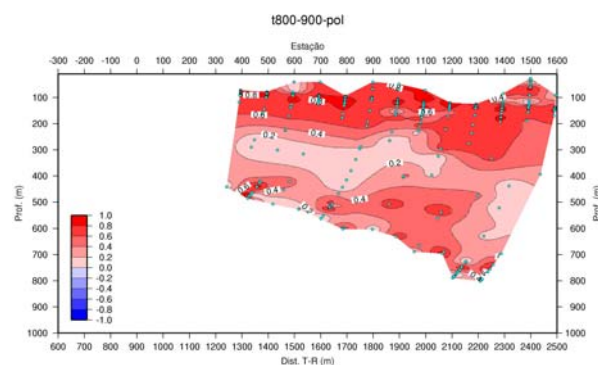


Figura 7b: Seção de polarização induzida processada com a solução dipolar e função Dias e Sato (Sato, 1979). Linha 800 com T na estação -900.

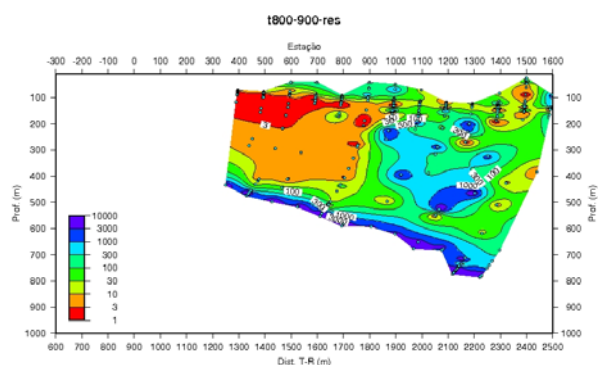


Figura 7c: Seção (7a) de resistividade aparente processada com a solução dipolar e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 800 com T na estação -900.

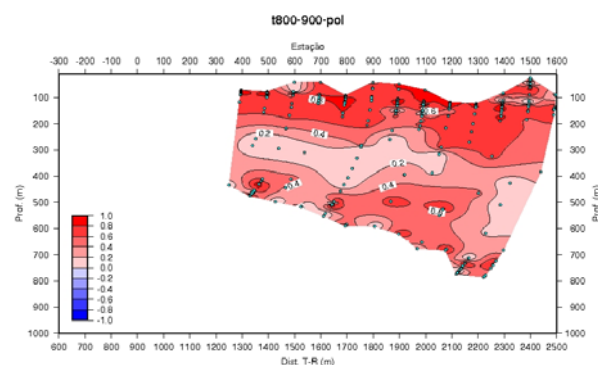


Figura 7d: Seção (7b) de polarização induzida processada com a solução dipolar e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 800 com T na estação -900.

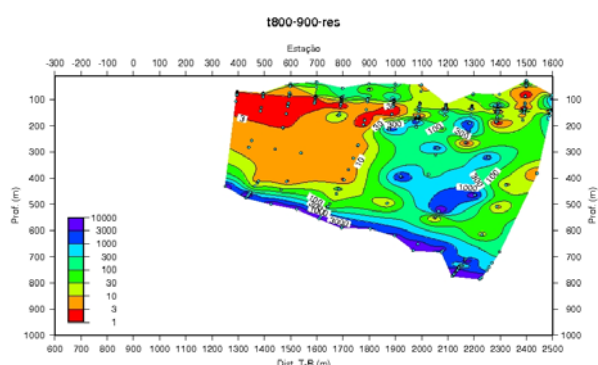


Figura 7e: Seção (7a) de resistividade aparente processada com a solução de fonte circular e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 800 com T na estação -900.

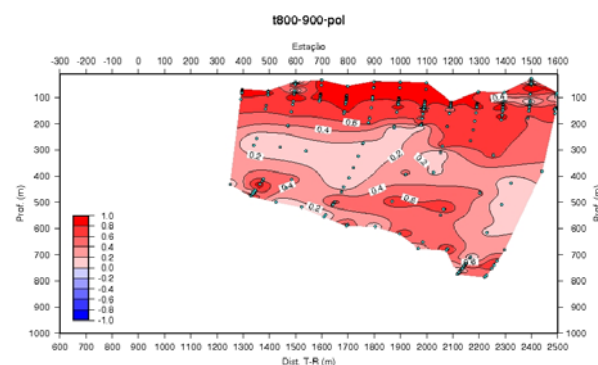


Figura 7f: Seção (7b) de polarização induzida processada com a solução de fonte circular e função Machado e Dias (Machado, 2009). Linha 800 com T na estação -900.