



A comparison between time and frequency domain IP applied to gold prospecting at Alta Floresta Gold Province (MT-Brazil)

Vicente de Paula Pinto (IG-UnB)*, Eduardo Xavier Seimetz (IG-UnB), Alexandre Santos Jerônimo da Costa (IG-UnB), Rafael Espindola Canata (LPGA-UFPR), Rodólfon Stevanato (LPGA-UFPR), Welitom Rodrigues Borges (IG-UnB), Francisco José Fonseca Ferreira (LPGA-UFPR), Willian Giovanni Zan (COOGAVEPE-MT)

Copyright 2017, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th 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 15th 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

The time domain induced polarization technique is widely employed to disseminated metallic minerals prospecting, however, large soil thickness, intense membrane polarization effects, and common oxidation of such minerals may make it difficult to detect areas of interest. As an alternative to bypass such problems, IP data were acquired on the frequency domain and showed promising results, having outlined with greater intensity anomalous zones observable in the time domain and reducing the effects of membrane polarization. The Eastern Sector of the Alta Floresta Gold Province (AFGP) answers to a significant amount of gold extracted on the Estate of Mato Grosso (MT, Brazil). The region has a considerable exploratory potential regarding primary gold occurrences that mainly responds for quartz veins associated with disseminated sulphide and oxide minerals, but can also occur in stockwork systems and disseminated in highly altered host granite-gneiss rocks.

Introdução

A área de estudo situa-se no setor leste da Província Aurífera Alta Floresta (PAAF), na porção norte do Estado do Mato Grosso (MT), próxima aos municípios de Matupá e Peixoto de Azevedo, onde a equipe ficou alojada (Figura 1).

Uma complexa variação litológica é observada na PAAF, representada por coberturas fanerozóicas, seqüências sedimentares do Paleozóico a Mesoproterozóico, granitos pós-colisionais e anorogênicos (1,75 Ga), unidades plutonovulcânicas e seqüências vulcano-sedimentares (1,96 – 1,74 Ga). Em parte, essas unidades foram afetadas por zonas de cisalhamento transcorrentes, formando extensas faixas milonitizadas (Miguel Junior, 2011).

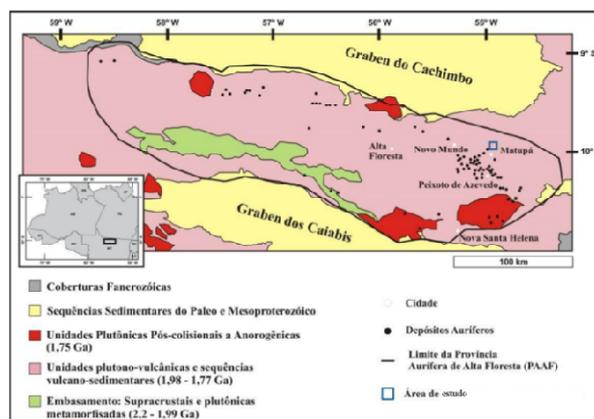


Figura 1 – Mapa geológico simplificado, contendo a distribuição dos principais domínios geológicos e os limites aproximados da PAAF. A área de estudo se encontra no quadrado azul (Paes de Barros, 2007).

As ocorrências de depósitos auríferos na Província Aurífera Alta Floresta encontram-se limitados e aparentemente controlados por descontinuidades estruturais, de amplitude regional e direção aproximada W -NW, definindo dois alinhamentos principais, um acompanhando a borda sul do gráben do Cachimbo e outro, a borda norte do gráben dos Caiabis.

Por outro lado, as mineralizações auríferas da região do setor Leste da PAAF evidenciam outro alinhamento segundo a direção NW, estendendo-se da região garimpeira do Trairão, a norte, até a região garimpeira do Peru. Essas ocorrências de depósitos auríferos mostram relação espacial com corpos graníticos, à exceção de algumas regiões garimpeiras localizadas ao longo da descontinuidade do Cachimbo, onde há associação espacial de mineralizações auríferas com rochas vulcânicas e subvulcânicas. Acredita-se que a instalação de zonas de cisalhamento e a granitogênese paleoproterozóica devem ter tido papel relevante na formação das mineralizações de ouro (Paes de Barros 1994, 2007)

Próximo à área de estudo localiza-se o depósito X1 (Figura 2), sob concessão da Mineração Monte Alegre, pertencente ao grupo Mineração Santa Elina Ltda e utilizado como referência metalogenética. Nele, são verificadas mineralizações na forma de disseminações e *stockworks*, veios e vênulas alojados sobretudo em granitos de idade paleo a mesoproterozóica. Os minerais de minério estão representados por pirita, calcopirita, rutilo e hematita, sendo o primeiro dominante. O depósito

pode ser enquadrado como do tipo ouro pórfiro, rico em ouro e pobre em cobre (Rodrigues, 2012).

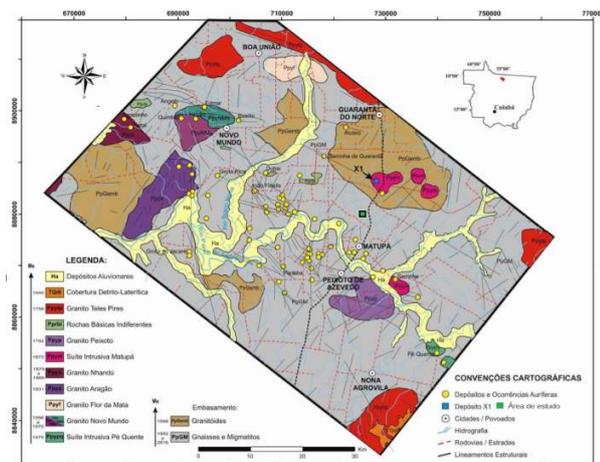


Figura 2 – Principais unidades geológicas da região de Peixoto de Azevedo – Novo Mundo, setor leste da PAAF (Miguel Junior, 2011).

A polarização induzida no domínio do tempo é amplamente empregada na prospecção de sulfetos disseminados. Para entender o funcionamento básico do método é interessante recorrer ao circuito da Figura 3, o qual representa de forma simplificada o comportamento de um material polarizável. Dias (2000) apresenta uma compilação de outros circuitos equivalentes adotados até então para descrever o fenômeno IP.

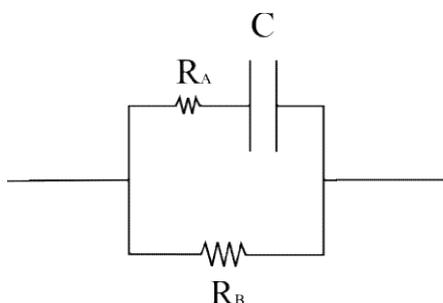


Figura 3 – Circuito simplificado comumente utilizado para representar materiais polarizáveis. (Marshall & Madden, 1959; Madden & Cantwell, 1967; Ward & Fraser, 1967; Pelton et al., 1978).

A medição no domínio do tempo pode ser entendida como uma medida total do fenômeno, onde se mede o decaimento do potencial acumulado pelo capacitor **C** após a interrupção da injeção de corrente elétrica.

Já nas medições de amplitude no domínio da frequência, mede-se a variação percentual na impedância do circuito devido à reatância do capacitor, isto é, a maiores frequências (AC) o capacitor permite a passagem de corrente elétrica, enquanto a baixas frequências (DC) ocorre o fechamento desse caminho não-Faradaico resultando em maiores valores de resistividade aparente medidos (Marshall & Madden, 1959; Madden & Cantwell 1967, Zonge et al. 1972; Sumner 1979; Ward, 1988).

Os parâmetros calculados são o Percentual de Efeito de Frequência (**PFE**) e o Fator Metal (**MF**), conforme as Equações 1 e 2

$$PFE = 100 \cdot \left(\frac{Z(f_{DC}) - Z(f_{AC})}{Z(f_{AC})} \right) = 100 \cdot \left(\frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{AC}} \right) \quad (1)$$

$$MF = 2\pi \cdot 10^3 \frac{PFE}{\rho_{DC}} \quad (2)$$

Metodologia

Os dados foram adquiridos ao longo do perfil de 750 metros exibido na Figura 4, com direção perpendicular às das principais mineralizações locais, utilizando como referência o depósito X1 (Figura 2), descrito por Rodrigues, 2012. O perfil foi elaborado em meio a um milharal recém colhido, com a topografia apresentando um declive de apenas 12 metros ao longo de toda a linha.

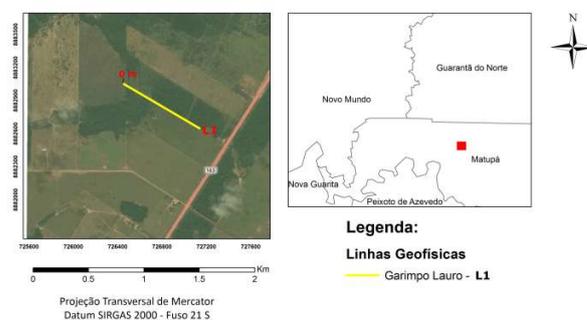


Figura 4 – Disposição da linha onde foram adquiridos os dados de IP no domínio do tempo e da frequência

O equipamento utilizado na aquisição dos dados de IP no domínio do tempo foi o Elrec Pro (*Iris Instruments*), com período de injeção de corrente de 2 e 8 segundos. O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo, com espaçamento mínimo de 25 metros entre os dipolos possibilitando 10 níveis de investigação e um total de 255 leituras.

A inversão dos dados de resistividade aparente foi feita com o software Res2Dinv (Geotomo), e envolveu as seguintes etapas: análise das curvas de decaimento, remoção de valores negativos e inversão robusta.

Os parâmetros do IP no domínio da frequência foram calculados a partir dos dados adquiridos com o equipamento Syscal Pro (*Iris Instruments*) em duas

frequências distintas, 0.5 Hz e 0.125 Hz, respectivamente, e foram utilizadas duas configurações distintas; uma com espaçamento mínimo de 10 metros entre os dipolos, proporcionando 17 níveis de investigação e um total de 1021 pontos medidos. Outra com espaçamento mínimo de 20 metros, proporcionando 14 níveis de investigação e um total de 364 leituras..

Para obtenção das sessões de resistividade elétrica, foram utilizados os dados adquiridos com 0.125 Hz, tendo sido filtrados os ruídos sistemáticos de fácil remoção, normalmente representados por *spikes* e valores de resistividade aparente iguais a zero, e dos ruídos aleatórios representados por leituras que apresentaram diferença logarítmica entre a resistividade aparente medida e a calculada durante o processo de modelagem inversa superior a 30% (Figura 5). Após a filtragem foram removidos apenas 6% dos dados de ambos arranjos, que apresentaram erro RMS absoluto de 4.7% e 7.3%, respectivamente.

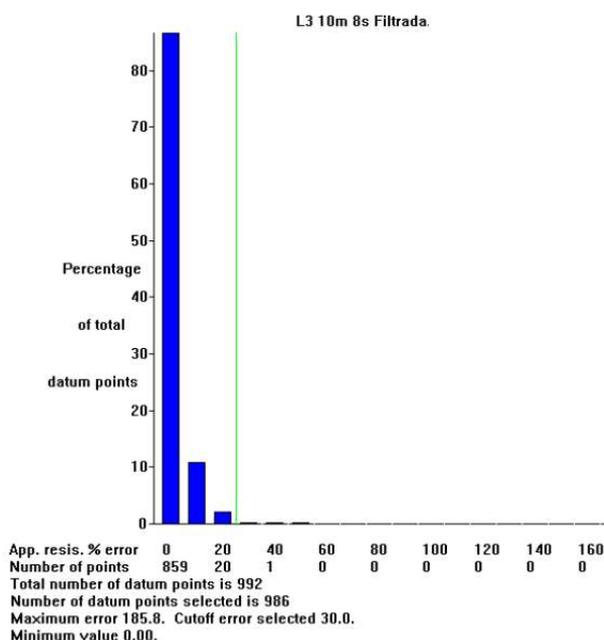


Figura 5 – Histograma de frequência por valor da diferença logarítmica percentual entre os valores medidos em campo e a pseudossessão calculada durante a rotina de modelagem inversa.

A partir dos dados de resistividade aparente, foram calculados o **PFE** e o **MF** (Equações 1 e 2) em ambiente MatLab (MathWorks). A modelagem dos dados envolveu as seguintes etapas: filtragem de *spikes*, remoção de valores negativos de grande amplitude e rotina de inversão robusta através do software Res2Dinv. Foram removidos 10% dos dados adquiridos com arranjo de 10 metros e erro RMS absoluto de 2.9% para o arranjo de 10 metros e 12% dos adquiridos com o arranjo de 20 metros e RMS de 3.9%.

As sessões geoeletricas obtidas após a modelagem inversa foram salvos em formato XYZ e importados ao programa Oasis Montaj (Geosoft), onde foi feita a análise geoestatística para definição dos intervalos de valores

das principais classes geofísicas, seguida da interpolação dos dados pelo método da Curvatura Mínima.

Resultados

Na Figura 6, A sessão de resistividade apresenta em sua parte mais superficial (0 a 15 metros) forte anisotropia horizontal de resistividade elétrica, com valores superiores a 1300 $\Omega.m$ e superando os 5000 $\Omega.m$ em regiões pontuais à qual é associada à zona insaturada do solo. Logo abaixo, foi registrada uma região de baixa resistividade, com seus valores variando de 100 a 585 $\Omega.m$ associada à transição entre zona insaturada e zona saturada, sendo o contorno de 202 metros atribuído ao nível freático (o qual varia entre 15 e 40 metros de profundidade) com pequenas regiões subordinadas a descontinuidades medindo valores inferiores a 60 $\Omega.m$. Nas partes mais basais da sessão, notam-se diversas descontinuidades geofísicas, bem como uma transição entre valores mais amenos de resistividade a noroeste, mais especificamente entre 60 e 350 metros do perfil, a valores mais elevados a partir dos 350 metros. Ambas regiões foram interpretadas como sendo o topo rochoso, sendo tal contraste lateral de resistividade atribuído a maiores ações de intemperismo na região entre 10 e 350 metros devido ao menor gradiente observado entre a zona saturada e topo rochoso. A sessão de PFE apresenta 2 anomalias de grande intensidade chegando a superar os 50%, de 110 a 210 metros e 250 a 310 metros, respectivamente, e uma de menor intensidade, alcançando apenas os 2%, entre 410 m e 510 m e passa a valores muito próximos de zero que se estende até os 670 metros da linha. Essa região se mostra associada à zona de resistividade mais elevada. A sessão se Fator Metal apresenta duas anomalias correlacionáveis aos demais produtos, centradas em 270 e 350 metros. A partir dos 370 metros, são observados valores de pequena amplitude que acompanham a forma da área mais resistiva da sessão de resistividade. Tanto a sessão de PFE quanto a de Fator Metal exibem valores superficiais moderados a altos. A última sessão da imagem, referente à Cargabilidade, apresenta seus valores de maior intensidade na parte mais superficial, superando os 25 mV/V até os primeiros 25 metros de profundidade. Nas partes mais basais da sessão, observam-se duas anomalias de intensidade superior aos 5.7 mV/V centradas em 175 e 250 metros, a 50 metros de profundidade. Outra também superior a 5.7 mV/V estendendo-se entre 325 e 440 metros, marcando uma transição a valores próximos de zero e alguns negativos de baixa amplitude. Nota-se em todos os produtos um contraste horizontal de propriedades físicas a partir de uma descontinuidade bem marcada na sessão de resistividade.

Na Figura 7, onde as sessões alcançam profundidades de até 72 metros, mantêm-se as principais feições observadas na Figura 6, sendo a sessão mais destoante a do **PFE**, o qual as anomalias verificadas próximas aos 50 metros de profundidade vistas na primeira metade da linha foram verticalizadas. Isso pode ter ocorrido por falta de pontos em profundidade na sessão da Figura 6.

Conclusões

As anomalias observadas tanto no PFE quanto no Fator Metal se correlacionam àquelas vistas na sessão de Cargabilidade, ainda que as diferenças de intensidade entre os valores sejam notórios. Os efeitos de alta intensidade superficiais observados em todos os produtos de IP foram atribuídos à polarização de membrana, o qual se mostra menos influente nos produtos do domínio da frequência. O maior intemperismo registrado por valores de resistividade mais amenos e de menor gradiente na primeira metade da sessão, aliado às anomalias intensas registradas no domínio da frequência, sugere que haja presença de mineralizações, visto que a oxidação da Pirita auxilia no processo de intemperismo através da liberação de ácido sulfúrico e prejudica o registro da mesma no domínio do tempo. As anomalias provavelmente estão associadas à presença de óxidos.

A técnica do IP no domínio da frequência pode se mostrar importante na prospecção mineral em regiões muito intemperizadas e com solo espesso, que favorece efeitos de polarização de membrana e prejudica a qualidade dos dados no domínio do tempo.

Referências

- Dahlin, T., & Leroux, V.** 2012. Improvement in time-domain induced polarization data quality with multi-electrode systems by separating current and potential cables. *Near Surface Exploration Geophysics*, 10(6), 545-565.
- Dahlin, T., & Loke, M. H.** 2015. Negative apparent chargeability in time-domain induced polarisation data. *Journal of Applied Exploration Geophysics*, 123, 322-332.
- Dias, C. A.** 2000. Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks. *Exploration Geophysics*, 65(2), 437-451.
- Loke, M. H.** 2014. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. Penang, Malaysia, Universiti Sains Malaysia.
- Madden, T. R., & Cantwell, T.** 1967. Part D: Induced polarization - A review. *Mining Exploration Geophysics*, 2, 373-400.
- Marshall, D. J., & Madden, T. R.** 1959. Induced polarization, a study of its causes. *Exploration Geophysics*, 24(4), 790-816.
- Miguel Júnior, E.** 2011. Mineralizações auríferas do lineamento Peru-Trairão Província Aurífera de Alta Floresta-MT: controle estrutural e idade U-Pb das rochas hospedeiras. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 62p.
- Nabighian, M. N., & Elliot, C. L.** 1976. Negative induced-polarization effects from layered media. *Exploration Geophysics*, 41(6), 1236-1255.
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., & Nelson, P. H.** 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Exploration Geophysics*, 43(3), 588-609.
- Paes de Barros, A. J.** 2007. Granitos da região de Peixoto de Azevedo: Novo Mundo e mineralizações auríferas relacionadas-Província Aurífera Alta Floresta (MT). Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências da UNICAMP (IG/UNICAMP), 143p.
- Rodrigues, R. M.** 2012. Caracterização geológica e metalogenética do depósito X1: Província Aurífera de Alta Floresta, região de Matupá (MT). Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências da UNICAMP (IG/UNICAMP), 67p.
- Seigel, H. O.** 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Exploration Geophysics*, 24(3), 547-565.
- Sumner, J. S.** 1979. The induced polarization method. *Exploration Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*, 123-133.
- Ward, S. H., & Fraser, D. C.** 1967. Conduction of electricity in rocks. *Mining Exploration Geophysics*, 2, 197-223.
- Ward, S. H.** 1990. Resistivity and induced polarization methods. *Geotechnical and environmental Exploration Geophysics*, 1, 147-189.
- Zonge, K. L., Sauck, W. A., & Sumner, J. S.** 1972. Comparison of time, frequency, and phase measurements in induced polarization. *Geophysical Prospecting*, 20(3), 626-648.

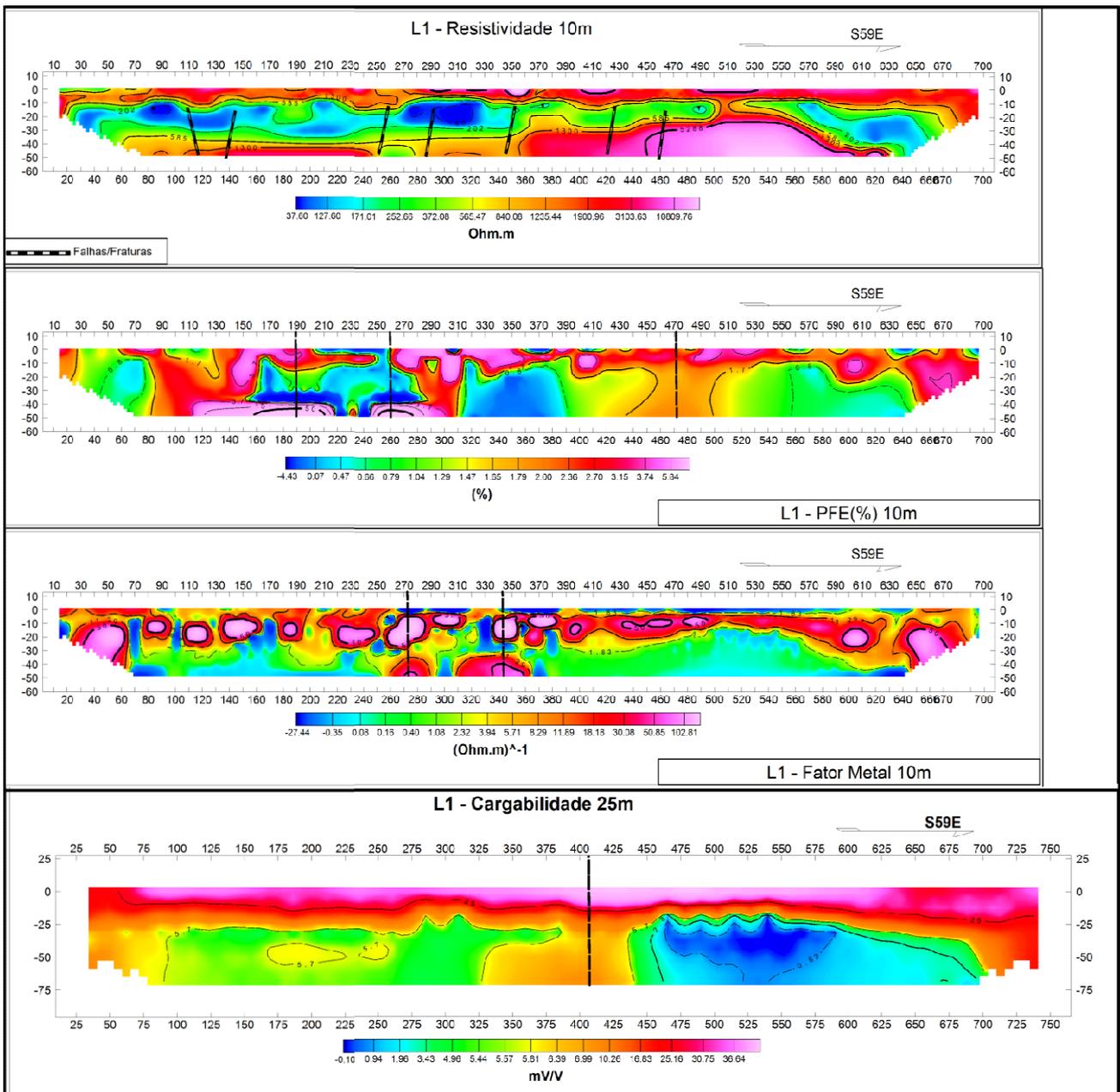


Figura 6 – O solo fora interpretado através da sessão de resistividade, o qual varia sua profundidade entre 10 e 15 metros, dando lugar ao nível freático que se estende aos 35 metros. O topo rochoso marcado por resistividade elétrica mais ascentuada se mostra a 40 metros na primeira metade da sessão e, após uma descontinuidade marcada próximo ao centro da linha, o topo é registrado a 23 metros de profundidade em média. A primeira metade da linha apresenta algumas anomalias importantes, todas subordinadas a descontinuidades, e a segunda metade apresenta em geral baixos valores em todos os produtos de IP nas profundidades associadas ao topo rochoso, o que sugere que este seja de composição granito-gnáissica coerente com a geologia da região

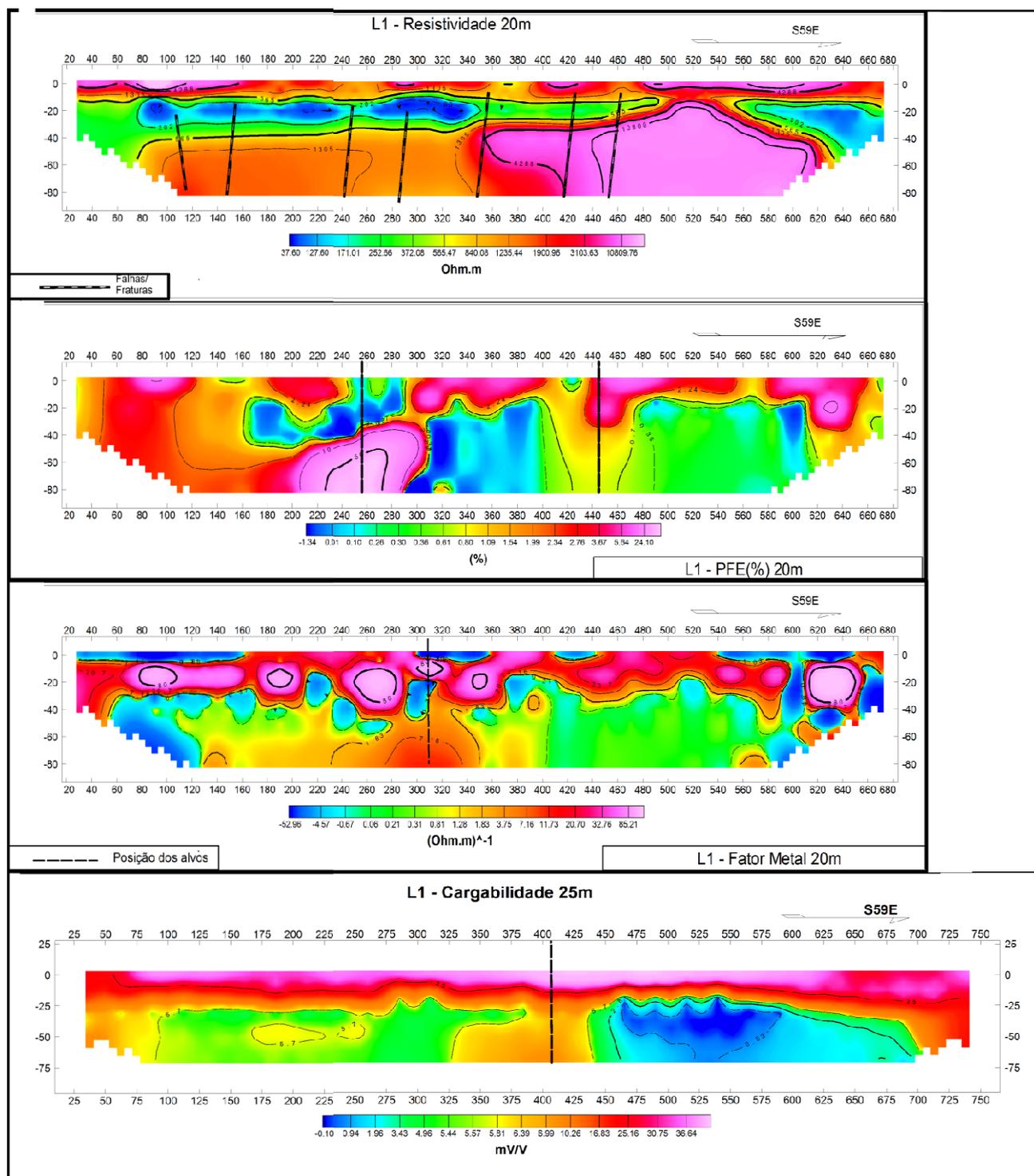


Figura 7 – A sessão de resistividade mantém as mesmas feições observadas na Figura 6, com solo variando entre 10 e 15 metros de profundidade, dando lugar à zona saturada, que se estende aos 40 metro, transitando ao topo rochoso. Nessa Figura, o contraste horizontal de resistividade na região interpretada como rocha se faz muito mais evidente, bem como a descontinuidade aproximadamente no centro da linha. A anomalia de **PFE** centrada em 260 metros da linha, a 35 metros de profundidade se mostra subordinada a essa descontinuidade, assim como a de Fator Metal. Na mesma região na sessão de Cargabilidade observa-se uma pequena anomalia da ordem de 5.7 mV/V. A principal anomalia de cargabilidade apresenta correspondência no domínio da frequência, porém com menor grau de importância e provavelmente está associada a um contato entre duas litologias ou à alterações hidrotermais devido à sua proximidade com a principal descontinuidade registrada.