

## Métodos geoeletricos aplicados à mineralização aurífera na área da mineração Tanque Fundo, Nossa Senhora do Livramento/MT.

Guilherme Meirelles da Motta (LGA, UnB)\*, Welitom Rodrigues Borges (LGA, UnB) e Paulo Henrique Praça (LGA, UnB).

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.

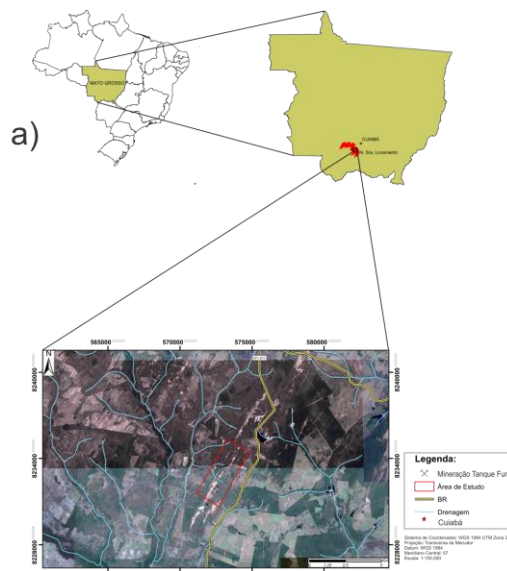
### Abstract

*This paper has the goal at application geoelectric methodologies of electrical resistivity (ER), induced polarization (IP) and spontaneous potential (SP) in identifying auriferous mineralization. The data were collected in two rows of acquisition in the Mining Tanque Fundo, located in the Gold Province of Baixada Cuiabana, county of Nossa Senhora do Livramento/MT. The gold in the study area is associated with quartz veins hosted in metasediments of the Cuiabá Group, and is always associated with sulfides resultant from hydrothermal alteration process. The ER data were acquired through electrical tomography technique, using the arrays dipole-dipole, Wenner, Wenner-Schlumberger and pole-dipole, with spacing of 5 m and 10 m. In the acquisition of IP data was used the dipole-dipole array with spacing of 10 m between electrodes. The SP data were acquired by the gradient technique with 5 m and 10 m spacing. The integration of data allowed to distinguish the main geoelectric units with the rock types presents in the two studied areas, such as thin and thick metarenites, phyllites and quartz veins with and without the presence of sulfides. The methods used in this study were able to identify structures and minerals associations, as well as, allowed the definition of seven targets which possibly the gold is deposited.*

### Introdução

A localização de depósitos de minerais com metodologia geofísica depende basicamente da existência de contraste entre alguma propriedade física dos depósitos e o ambiente que o cerca. A propriedade física de um depósito, por sua vez, está diretamente relacionada à propriedade física dos minerais presentes e seu volume (LUIZ, 2013). O ouro apresenta valores de densidade entre 15 e 19 g/cm<sup>3</sup> e condutividade elétrica elevada (maior do que 10<sup>7</sup> S/m). Apesar desses elevados valores de propriedades físicas, o ouro não é detectado diretamente devido a sua baixíssima concentração no ambiente geológico. Assim, a metodologia geofísica aplicada na prospecção de ouro visa detectar estruturas, associações minerais ou o ambiente onde se encontram os depósitos. Neste trabalho, foram utilizados os métodos terrestres da eletrorresistividade, polarização induzida e do potencial espontâneo, com o objetivo de identificar depósitos auríferos com ocorrência nos veios

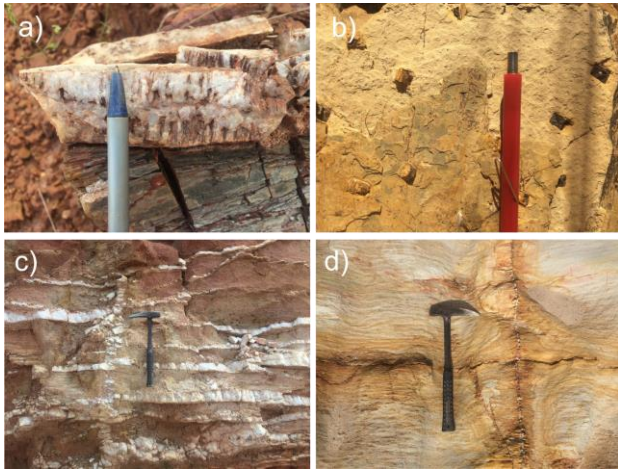
de quartzo encaixados nos metassedimentos da Baixada Cuiabana. A área de estudo foi a Mineração Tanque Fundo, localizada porção centro sul do estado do Mato Grosso no município de Nossa Senhora do Livramento (figura 1a). Situada na formação Acorizal do Grupo Cuiabá (Faixa Paraguai), a área pesquisada insere-se no contexto do alinhamento Cangas-Poconé de Tokashiki e Saes (2008), que constitui um cinturão de cisalhamento de direção NE-SW, que por sua vez abriga e condiciona os veios de quartzo responsáveis pela mineralização. Na região observam-se metarenitos finos a grossos (localmente conglomeráticos) (Figura 1b) de coloração creme a amarelo claro, intercalados por lentes de filito rosa avermelhado (Figura 1c), subordinados.



**Figura 1 – a) Mapa de localização; b) Metarenito localmente conglomerático; c) Filito rosa avermelhado.**

A mineralização de ouro está associada a duas famílias principais de veios de quartzo: a principal (NE-SW), encaixada no cisalhamento principal, e a NW-SE, ortogonal a esta, preenchendo fraturas extensionais, como revelam os cristais de quartzo dispostos perpendicularmente às paredes dos veios (figura 2a). Os veios possuem espessuras variando de 0,5 cm a 5 m e quando mineralizados ocorrem sempre acompanhados

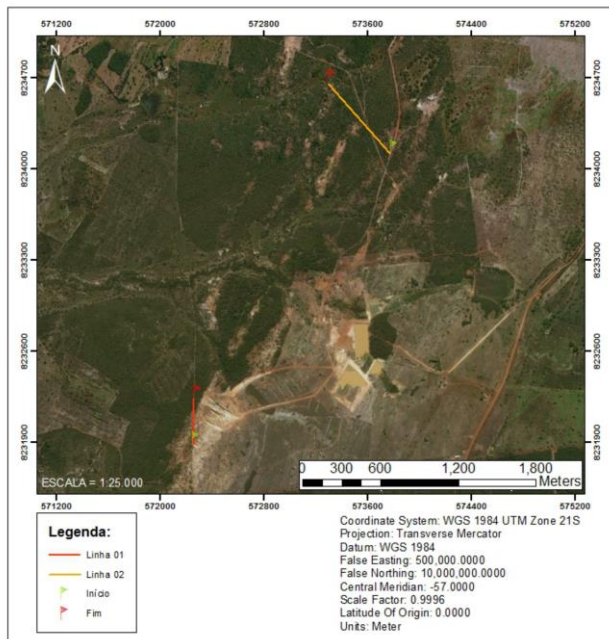
por alteração hidrotermal, marcada predominantemente por uma sulfetação. Macroscopicamente apenas piritas foram reconhecidas (figura 2b). Os teores de ouro são potencializados na interseção das duas famílias principais (figura 2c) e tendem a diminuir nos veios ortogonais (NW-SE) na medida em que estes distanciam-se da família principal (NE-SW). Os halos de alteração hidrotermal (figura 2d) no geral restringem-se às imediações dos veios, conferindo à rocha encaixante próxima, baixos teores em ouro.



**Figura 2** – a) Cristais de quartzo perpendiculares à parede do veio; b) Sulfetação marcada por piritas c) Interseção de veios de quartzo; d) Halo de alteração hidrotermal.

### Metodologia

O estudo consistiu em duas linhas de aquisição em diferentes áreas da mineradora, onde realizou-se os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e do potencial espontâneo (figura 2).



**Figura 3** – Mapa de localização das linhas de aquisição.

A primeira linha de aquisição foi 360 metros de comprimento, orientada na direção N20E. Realizou-se esse perfil na mesma orientação do *trend* principal, com o objetivo de interceptar as estruturas perpendiculares a essas feições e se apresentam mais intensamente mineralizados em ouro (SILVA, 2002). A segunda linha de aquisição realizada (Figura 4.2) compreendeu 720 metros de comprimento, e foi orientada na direção NW-SE. A direção da linha de aquisição, oblíqua as principais famílias de veios de quartzo presentes na área, foi orientada de modo que a linha de aquisição intercepte tanto os veios que apresentam orientação no sentido NE, como os veios orientados para NW.

**Eletrorresistividade** – Adquiriram-se os dados de ER por meio da técnica de aquisição do caminhamento elétrico. O equipamento utilizado para a aquisição dos dados foi o SYSCAL PRO 72 da *Iris Instruments*, com cabos multieletródos e eletrodos metálicos. A injeção de corrente ocorreu no intervalo de 0,5 segundos, e aplicou-se uma tensão de 400 V. Com o intuito de comparar as respostas de diferentes arranjos eletródicos nas áreas estudadas, realizaram-se aquisições utilizando os arranjos Dipolo-Dipolo (DD), Wenner Alfa (WN), Wenner-Schlumberger (WS) e Pólo-Dipolo (PD). Os parâmetros utilizados para a aquisição dos dados estão descritos na tabela 1. O arranjo pólo-dipolo não foi realizado na primeira linha porque não havia espaço suficiente para posicionar o eletrodo de corrente no infinito, devido a linha de aquisição localizar-se próximo à cava de exploração.

**Tabela 1** – Parâmetros de aquisição do método ER.

Linha	Arranjo	Espaçamento	Níveis de Investigação	Pontos adquiridos	Profundidade de Investigação
01	DD	5 m	34	1749	40 m
01	WN	5 m	19	840	45 m
01	WS	5 m	30	1230	59 m
02	DD	10 m	34	1747	84 m
02	WN	10 m	30	840	119 m
02	WS	10 m	19	1230	91 m
02	PD	10 m	34	1819	132 m

Foi realizado no software Prosys II da *Iris Instruments* a organização, redução e ajuste dos dados. Nesta etapa, verifica-se a consistência dos dados, filtram-se os spikes, dados que apresentaram alta resistência de contato, com corrente igual a zero e os valores que não condizem com o modelo geológico. Em seguida, realizou-se a inversão dos dados no software de RES2DINV, da Geotomo. A rotina baseou-se no método da inversão robusta, opção utilizada quando espera-se a presença corpos bem delimitados (LOKE, 2004), por meio do método de otimização Gauss – Newton. Utilizaram-se as funções de eliminar dados espúrios, estatísticas de erro RMS e refinamento de modelo.

**Polarização Induzida** – As medidas de IP ocorreram no domínio do tempo, com o mesmo equipamento utilizado nos levantamentos de ER. Os parâmetros utilizados para a aquisição nas duas linhas foram semelhantes. O arranjo utilizado para a aquisição foi o dipolo-dipolo, com

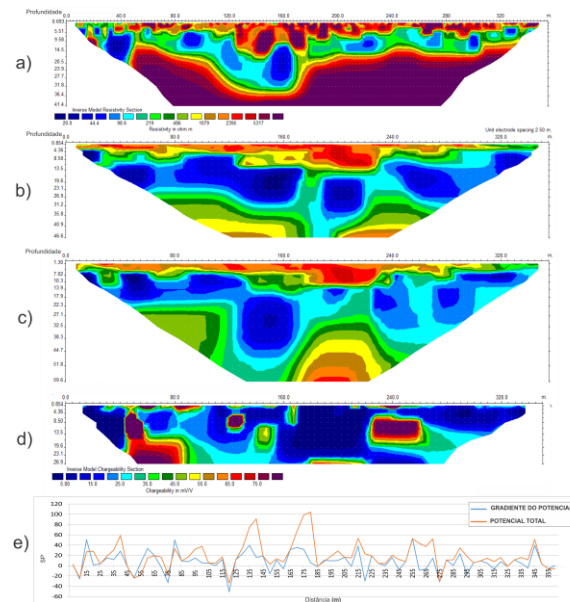
espaçamento entre os eletrodos de 10 m e eletrodos não polarizáveis. O tempo de injeção de corrente foi de 4 segundos com tensões de 800 volts. Configurou-se a quantidade de *stacks* para 4 a 16 medidas, com desvio padrão de 2%. Para a primeira linha foram adquiridos 285 pontos de investigação, enquanto para a segunda adquiriram-se 645 pontos, ambas com 10 níveis de investigação. A inversão foi feita com o mesmo software dos dados de ER. Analisaram-se as curvas de descarga de IP, sendo removidos os dados que não apresentam um comportamento exponencial de uma curva de decaimento de IP. Eliminou-se os dados que apresentavam valores de resistência de contato maiores que 25 K $\Omega$  para a primeira área, e 30 K $\Omega$  para a segunda linha. No primeiro perfil, os números de pontos investigados após a filtragem foi reduzido para 191. As inversões realizadas para os dados de cargabilidade após 5 iterações, tiveram erro RMS foi de 15,3%. Para a segunda linha o erro RMS foi de 12,8 %

**Potencial Espontâneo** – Os dados de SP foram adquiridos através de um voltímetro de alta impedância, e um par de eletrodos porosos. A técnica de investigação empregada foi a do *leapfrog*. O espaçamento utilizado na primeira área foi de 5 metros, enquanto no segundo perfil o espaçamento foi de 10 metros. A aquisição dos dados SP foi realizada separadamente dos métodos ER e IP, para não ter influência da corrente injetada no solo. Realizaram-se 72 medidas de diferença de potencial para cada linha. No começo e no final da aquisição foram feitas leituras com os dois eletrodos posicionados a poucos centímetros de distância para obter o *drift*. Desse modo, realizou-se uma média dos dados, sendo esses valores utilizados para efetuar a redução nos dados brutos de SP. Os dados foram interpretados qualitativamente através da forma do perfil, amplitude, polaridade, e do padrão apresentado.

## Resultados

**Linha 01** – Para o método ER, os valores de corrente com o arranjo DD (figura 4a) apresentam-se entre 20 e 160 mA. O topo rochoso da seção se encontra bem definido, e varia de 2 m nas extremidades do perfil, para 20 m de espessura no centro. O arranjo WR (figura 4b) apresentou valores de resistividade entre de 10 a 5.000 ohm.m. Na região central, a seção apresenta um comportamento predominantemente condutivo (<100 ohm.m) até aproximadamente a profundidade de 35 m. O arranjo WS (figura 4c) apresentou resultados parecidos com o WR, porém com 14 m de investigação a mais e valores de resistividade entre de 7 a 4.900 ohm.m, e corrente de até 580 mA. Para os valores de cargabilidade referentes à Linha 01, observou-se uma variação entre 0.8 e 224 mV/V (figura 4d). No modelo inverso gerado para o primeiro perfil dos dados IP, definiram-se anomalias presentes com comportamento evidenciando alta cargabilidade. Na posição de 125 m, apresenta-se uma anomalia a 5 m de profundidade com valores superiores a 100 mV/V. Os dados de potencial espontâneo correspondentes a Linha 01 (Figura 4e), apresentam variação entre -50 e 103 mV. O fluxo de água em subsuperfície, no mesmo sentido da linha de aquisição, é um fator que contribuiu para essa variação. No perfil, nota-se entre as posições de 30 a 80 m, o

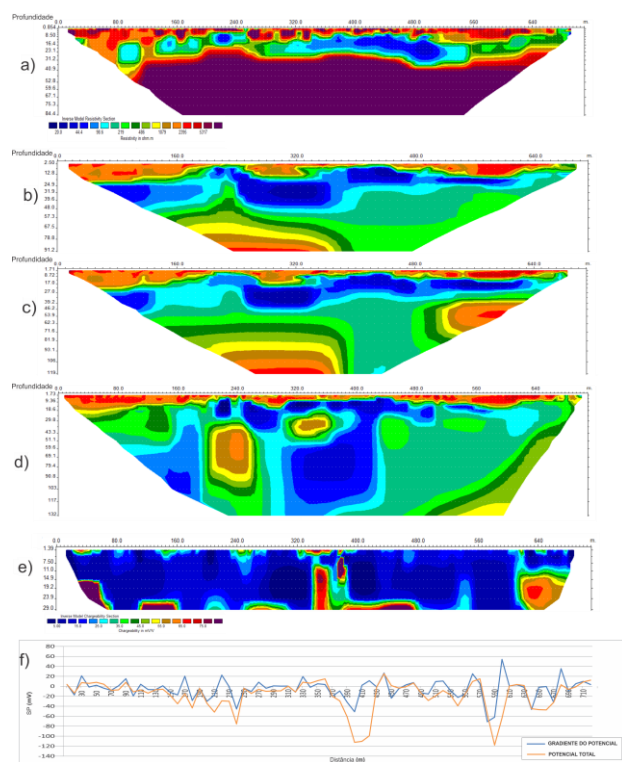
mesmo padrão de comportamento das fases, atingindo valores negativos na ordem de -30 mV. Em 120 m é evidenciado a anomalia com polaridade negativa de maior amplitude no perfil, seguida esta de dois picos com altos valores de potencial total. Entre as posições 220 e 275 m, ressaltam-se duas fases do gradiente do potencial de mesma amplitude. Em geral, definiram-se três unidades geofísicas distintas: A primeira corresponde à porção mais rasa da seção, onde os valores de resistividade apresentam-se com valores superiores a 3.000 ohm.m. Essa camada apresenta-se mais adelgada no centro dos perfis, com diminuição de espessura no sentido das extremidades. A segunda unidade é caracterizada por uma zona condutiva (<150 ohm.m) comum a todas as seções a partir de aproximadamente 6 m de profundidade. A terceira unidade corresponde à camada sobrejacente a unidade dois, onde encontram-se rochas com resistividades intermediárias. Essa camada é presente em profundidades maiores, e não evidencia ter continuidade horizontal.



**Figura 4** – Seções da Linha 01 com os métodos a) ER com arranjo DD; b) ER com arranjo WR; c) ER com arranjo WS; d) IP com arranjo DD; e) SP.

**Linha 02** – Nota-se que na segunda linha a corrente limitou-se a um intervalo menor (entre 11 a 105 mA) em comparação com a primeira linha. O modelo inverso de resistividade para o arranjo DD (figura 5a) apresenta valores com grande variação de resistividade. O arranjo WR apresentou resistividades entre 18 e 7.500 ohm.m. Na posição central do perfil destaca-se uma anomalia de baixa resistividade (<50 Ohm.m) e aproximadamente 28 m de espessura (figura 5b). No arranjo WS apresentam-se duas anomalias com padrões semelhantes e valores de resistividade variando de média à alta (figura 5c). Evidencia-se uma quebra de aproximadamente 90° na feição apresentada próxima à distância de 360 m. O arranjo PD (figura 5d) foi o que possibilitou maiores profundidades de investigação (~130 m). A partir das seções geradas nota-se que o meio investigado apresenta valores predominantemente condutivos.

Todavia, na posição entre 210 e 360 m, destacam-se duas anomalias com padrão de resistividade alta (>2.000 ohm.m). No centro da seção, destaca-se uma anomalia condutiva com aproximadamente 60 m de largura. No segundo perfil de IP (figura 5e), a cargabilidade variou de 0.01 a 213 mV/V (Figura 6.8), alcançando a profundidade de aproximadamente 29 m de investigação. A resposta de cargabilidade para o meio foi predominantemente baixa (< 23 mV/V). No modelo gerado para os dados IP são presentes entre as posições de 340 e 360 m duas anomalias. A anomalia superior limita-se a apenas 3 m de profundidade. A anomalia inferior apresenta uma resposta de 65 a 80 mV/V, e evidencia uma continuidade vertical. Evidencia-se anomalia bem definida entre os 370 a 385 m apresentou altos valores de cargabilidade (>100 mV/V). Os dados SP para a segunda linha (figura 5f) apresentaram uma grande variação. Em 120 m é evidenciada a anomalia com polaridade negativa de maior amplitude do perfil, seguida esta de dois picos com altos valores de potencial total. Entre as posições 220 e 275 m, ressaltam-se duas fases do gradiente do potencial de mesma amplitude. Nota-se que o potencial total só se apresenta com mesma amplitude na segunda fase, o que pode ser explicado pelo fato do potencial total não representar somente a medida realizada pontualmente.



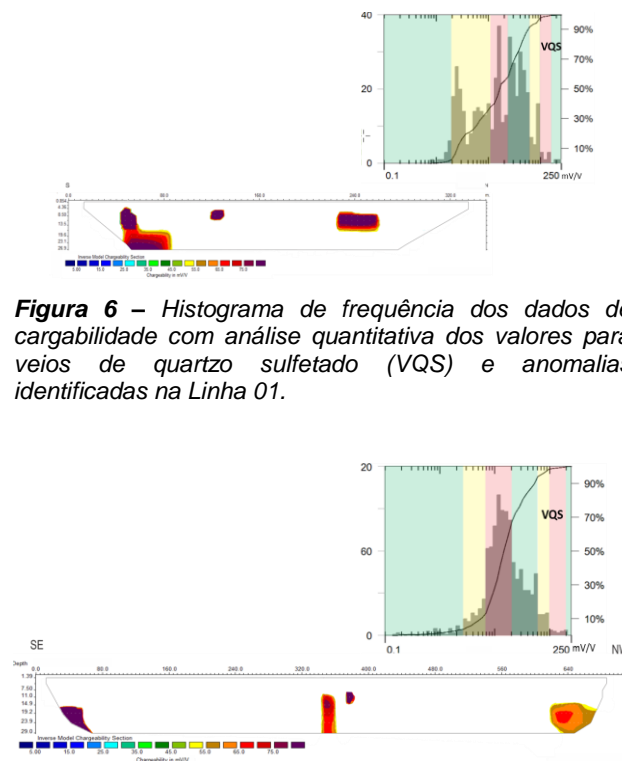
**Figura 5** – Seções da Linha 02 com os métodos a) ER com arranjo DD; b) ER com arranjo WR; c) ER com arranjo WS; d) ER com arranjo PD; e) IP com arranjo DD; f) SP.

A partir dos dados da Linha 02, definiram-se quatro unidades distintas: A unidade mais rasa apresenta espessura variável e valores de resistividade maiores que

2.000 ohm.m. A segunda unidade representa uma zona condutiva com aproximadamente 18 m de espessura, onde encontram-se as anomalias mais significativas para o estudo. A terceira unidade possui valores de resistividade predominantemente com 500 ohm.m. A última unidade é definida por área representada por variações de resistividade média à alta com profundidades mais significativas. Sendo esta só possível ser totalmente definida a partir do arranjo pólo-dipolo.

### Conclusões

Com o método da eletrorresistividade determinou-se as camadas, discontinuidades e os contatos litológicos. O arranjo WN foi o que obteve maior razão sinal ruído, seguido dos arranjos WS, PD e DD. Apesar baixa razão sinal ruído, o arranjo DD obteve elevada sensibilidade a efeitos laterais e possibilitou a definição do topo rochoso em 14,5 m de profundidade para a primeira linha de aquisição e 22 m para a segunda. O arranjo WS possibilitou maior resolução de estruturas inclinadas/verticais, seguidamente dos arranjos WN, DD e PD. O arranjo WN foi o que obteve maior resolução de estruturas horizontas. O arranjo PD possibilitou a maior profundidade de investigação, chegando a 132 m. Os dados de IP permitiram a definição de áreas onde há ocorrência de sulfetos associados à mineralização, representadas por anomalias com valores de cargabilidade maiores que 60 mV/V nas duas linhas de aquisição.



**Figura 6** – Histograma de frequência dos dados de cargabilidade com análise quantitativa dos valores para veios de quartzo sulfetado (VQS) e anomalias identificadas na Linha 01.

**Figura 7** – Histograma de frequência dos dados de cargabilidade com análise quantitativa dos valores para veios de quartzo sulfetado (VQS) e anomalias identificadas na Linha 01.

Apesar do método do potencial espontâneo ter apresentado grande variação, foi possível a definição de anomalias associadas à presença de sulfetos em ambas as linhas de aquisição. O método SP foi de suma importância para amarrar os dados geoeletricos adquiridos. Como a mineralização aurífera no local ocorre sempre onde há presença de sulfetos, os métodos IP e SP permitiram a identificação veios de quartzo sulfetados nas duas linhas de aquisição. Do modo que os veios de quartzo apresentam alta resistividade ( $>3.000 \text{ ohm.m}$ ) e altos valores de SP, e os sulfetos apresentam alta condutividade e baixo SP, os valores se subtraem, o que causa uma dificuldade na interpretação dos dados. Devido à orientação da Linha 02 foi possível a identificação tanto dos veios no sentido NW (filão) com mais presença de sulfetos, quanto do veio no sentido NE (canoão) menos intensamente sulfetado. Os resultados apresentados corroboram a aplicabilidade dos métodos elétricos para a caracterização de áreas com mineralizações auríferas associadas a sulfetos em veios de quartzo. A partir da integração dos dados, definiram-se sete potenciais alvos para ocorrência aurífera, sendo três localizados na primeira linha de aquisição e quatro na segunda linha.

#### Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Companhia Matogrossense de Mineração (METAMAT) e ao Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília (LGA/UnB) pela viabilização do projeto. Ao geógrafo Péricles e toda a equipe de campo.

#### References

- BRAGA, A. C. O.** 1997. Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro-SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 173p.
- BUTLER, D. K.** 2005. Near-Surface Geophysics: Investigations in Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysics SEG. No. 13, 732p.
- DNPM.** Sumário Mineral 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2014.pdf>>.
- EDWARDS, L. S.** 1977. A Modified Pseudo-Section for Resistivity and Induced Polarization. *Geophysics*, v. 42, p.1020 – 1036.
- GALLAS, J. D. F.** 2000. Principias métodos geométricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro-SP, 258p.
- GALLAS, J. D. F.** 2005. O método do potencial espontâneo (SP) – uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 23(2), p.133-144.
- GEOTOMO.** 2003. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares methods. Manual do usuário Res2Dinv, 129p.
- LOKE, M. H.** 2004. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. 136p. Disponível em: <http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip>.
- LUIZ, J. L.** 2013. *Geofísica na Prospecção Mineral: Guia para Aplicação*. Rio de Janeiro: SBGF, 90p.
- SILVA C. H.; SIMÕES L. S. A.; RUIZ A.S.** 2002. Caracterização estrutural dos veios auríferos da região de Cuiabá, MT. *Revista Brasileira de Geociências*, 32:407-418.
- SUMNER, J. S.** 1976. *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 277p.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.** 1990. *Applied Geophysics*. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 770p.
- TOKAHASHI, C. D. C.; SAES, G. S.** 2008. Revisão estratigrafica e faciologia do Grupo Cuiabá no alinhamento Cangas-Poconé, Baixada Cuiabana, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(4), p.661-675.
- TRINDADE, R. B. E.** 2002. *Extração de Ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente*. CETEM, Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, 312p.
- WARD, S. H.** 1990. Resistivity and polarization methods. *Geotechnical and environmental geophysics*. Tulsa: SEG. v.3, p. 147-189.