

Aplicação conjunta dos métodos eletromagnéticos aéreo (VTEM) e de furo na pesquisa de níquel sulfetado em Goiás.

Eduardo Henrique*, Saulo Batista de Oliveira**, Allan Fruchting**, João Henrique Boniatti** e Gustavo Diniz Oliveira**

*Reconsult Geofísica ** Votorantim Metais

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

The present work shows and discusses the results of a VTEM and a BHEM survey over a known nickel deposit at the Goiás state, Brazil. Both electromagnetic data were inverted. The resultant conductors were compared with the geological ore body that was obtained from around 10,000 meters of diamond drilling. There is an impressive correlation between EM and ore models. The VTEM and BHEM data were capable to predict the location of the ore body. The results demonstrated that the suggested geophysical methodology is ideal to reduce risks and exploration costs.

Introdução

No passado recente o detalhamento das anomalias condutivas, definidas por um aerolevantamento através de métodos geofísicos terrestres, era imperativo antes de qualquer campanha de sondagem.

Atualmente, com o desenvolvimento de sistemas eletromagnéticos no domínio do tempo em plataformas helitransportadas, como o sistema VTEM, tornou-se possível identificar e sondar diretamente pequenos condutores que podem estar relacionados a corpos sulfetados de interesse econômico.

Não há dúvidas sobre os diversos benefícios de se sondar condutores a partir de dados aéreos. Contudo, devido aos erros inerentes de qualquer prospecção geofísica, sempre ficam dúvidas, principalmente se o condutor – corpo sulfetado – foi interceptado da melhor forma. Ou mesmo no caso extremo, quando a sondagem não cruza nenhum condutor, sugerindo que ela tenha passado próxima da mineralização sem interceptá-la.

Principalmente na pesquisa de níquel sulfetado, a decisão de se sondar diretamente anomalias aéreas é quase sempre correta. Como complemento à sondagem, é importante que alguns furos executados sejam levantados pela técnica geofísica de poço eletromagnética aqui chamada de BHEM, da expressão em inglês "Bore Hole ElectroMagnetics".

Este trabalho mostra e discute os resultados da aplicação conjunta de dados EM helitransportados e dados de EM de poço em um depósito de níquel sulfetado no estado de Goiás. A área foi intensamente sondada, portanto, o

depósito serviu de testes para se avaliar as técnicas VTEM e de BHEM na pesquisa de sulfetos maciços.

Caracterização do Depósito

A mineralização de níquel sulfetado associados a lavas komatiíticas (KHNS - *Komatiite Hosted Nickel Sulphide*) é encontrada na base dos derrames característicos de *greenstone belts*. Devido a elevada temperatura destes derrames, ocorre a erosão termal dos litotipos subjacentes assimilando o enxofre nelas contido. Na presença de um líquido sulfetado o Ni tende a formar pentlandita, tomando a fase silicata (olivinas) depletada neste elemento (Leshner, 1989; Hill, 2001).

Assim, neste tipo de depósito tem-se como minério a associação típica de pirrotita, calcopirita e pentlandita, amplamente disseminada na literatura como associação MSS (*monosulphide solution*) (Naldrett, 1989), como é o caso da ocorrência enfocada neste trabalho (Fig. 1).



Figura 1 Fotos de testemunhos de sondagem da mineralização sulfetada

As unidades geológicas caracterizadas na área correspondem a uma estreita seqüência de rochas máfica-ultramáficas e uma seqüência metassedimentar com cerca de 7 km de extensão e direção geral E-W. A primeira sobreposta a corpos granitóides do embasamento e seccionada por corpos intrusivos máficos e félsicos.

A coluna estratigráfica na área onde ocorrem os corpos mineralizado é dada por komatiitos, hospedeira de

Aplicações de EM aéreo e de poço em um depósito de níquel em Goiás.

minério, representando a base da seqüência ultramáfica, com intercalações localizadas de basaltos komatiíticos e serpentinitos e, subordinadamente, de sedimentos químicos (BIFs e metacherts).

A mineralização sulfetada verificada encontra-se hospedada na base de seqüências metavulcânicas ultramáficas (komatiitos e serpentinitos) sobrepostas a seqüências de rochas metavulcânicas máficas (basaltos komatiíticos). Estes níveis mineralizados, embora ocorram de forma bastante variável, geralmente não ultrapassam 2 m, sendo constituída por uma zona de sulfetos maciços que progressivamente passam para uma zona com textura em rede para finalmente passar para uma zona de disseminação (Fig. 2).

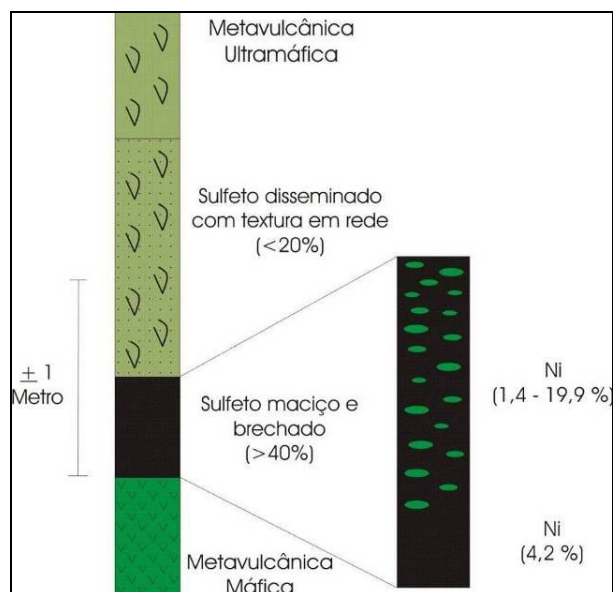


Figura 2 Seção esquemática da zona mineralizada do depósito estudado.

Tanto a relação textural quanto a composição do minério sulfetado são condizentes com uma origem magmática primária para a mineralização de níquel. A razão Ni/Cu do minério sulfetado é elevada (± 10) e comparável com a maioria dos depósitos de sulfeto associados a komatiitos.

Sondagens realizadas na área estudada interceptaram diversos níveis que sugerem um comportamento do minério similar a pequenas lentes descontínuas espaçadas, ocorrendo com *trend* para NW-SE.

O modelo de mineralização mais provável para as áreas pesquisadas, se baseiam no tipo de ocorrência primária de sulfetos de níquel inseridos em derrames de lavas komatiíticas. Feições deste tipo foram definidas nos depósitos de níquel sulfetado em derrames komatiíticos, no Canadá, Abitibi e na Austrália Ocidental, Província de Kambalda (Hill, 2001).

Levantamentos conduzidos

Sobre os corpos de níquel conhecidos foram executados dois aerolevantamentos, ambos com o sistema VTEM. O primeiro com linhas na direção leste-oeste separadas em 250 metros. Um segundo, com linhas norte-sul separadas em 100 metros.

Diversas sondagens foram conduzidas, testando praticamente todas as zonas condutivas. Seis furos foram selecionados para serem testados pela técnica BHEM. A figura 3 mostra a localização dos seis furos com BHEM sobre os perfis EM do levantamento leste-oeste e sobre a imagem EM do levantamento com linhas norte-sul.

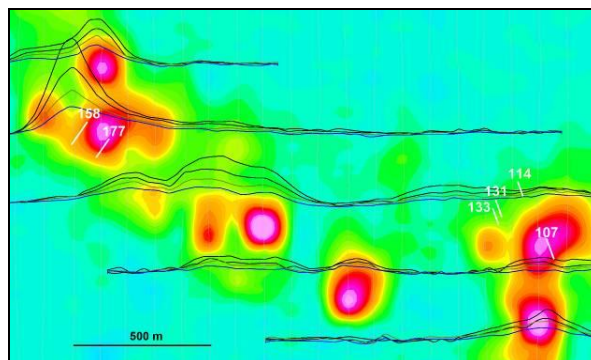


Figura 3 Localização das sondagens levantadas pela técnica eletromagnética de poço (BHEM) sobrepostas aos perfis EM leste-oeste e a imagem EM (canal tardio) do levantamento EM de detalhe com linhas norte-sul.

Os furos 158 e 177 foram levantados por BHEM, pois, havia dúvidas se as mineralizações interceptadas seriam suficientes para gerar a anomalia identificada no levantamento aéreo com linhas EW. Será que não haveria um corpo de interesse próximo contribuindo para a anomalia observada?

Nos furos 114, 130 e 131 foram conduzidos BHEM para se verificar uma possível continuação à nordeste da mineralização interceptada no furo 107. O qual também foi levantado com BHEM para se avaliar a potencialidade da ferramenta de EM de poço no detalhamento de corpos de níquel sulfetado.

Estudos efetuados

Estudos geofísicos terrestres, inclusive TDEM, foram conduzidos na época da descoberta das mineralizações. Contudo, provavelmente devido a restrições de orçamento, os furos executados no início foram poucos e de profundidade máxima de 100 metros.

Com a mudança do prospecto para outra empresa. Os trabalhos de investigação foram reiniciados. Inicialmente investiu-se em um levantamento de VTEM, o qual definiu diversas anomalias que foram invertidas. A figura 4 mostra o modelamento da linha de VTEM que passa sobre a zona mais mineralizada. O corpo condutor ajustado (placa em verde na figura) tem dimensões de 120 x 300 metros, mergulha com $N360^{\circ}/10^{\circ}$ e seu centro está a cerca de 150 metros de profundidade. O produto espessura-condutividade (CT) da placa ajustada é de 215 S.

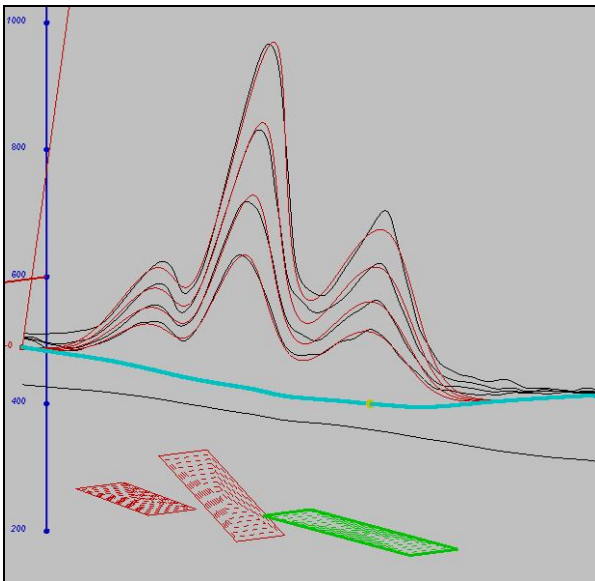


Figura 4 Resultado da inversão de uma linha VTEM NS sobre as mineralizações sulfetadas conhecidas concentradas principalmente na região da placa verde, cujo o centro está a cerca de 150 metros de profundidade.

Após a finalização das sondagens, localizadas principalmente na placa verde da figura 4, foram executados o levantamento BHEM e o modelamento eletromagnético para tirar algumas dúvidas exploratórias e avaliar a metodologia BHEM. Paralelamente, o grupo de pesquisa da Votorantim Metais integrava os dados químicos e geológicos dos testemunhos, os visualizando em ambiente tridimensional.

O levantamento BHEM foi conduzido com uma sonda modelo BH43-3, um receptor PROTEM de 20 canais e um transmissor TEM 37/67, todos fabricados pela Geonics™. A frequência utilizada foi de 3 Hz. Foram efetuadas medidas das componentes X,Y e Z do campo eletromagnético a cada quatro metros.

Os dados EM foram analisados e modelados no software Maxwell™.

Modelamento eletromagnético

Furos 158 e 177

As respostas das componentes A (direção *up hole*), U (12 horas quando olhando para o furo) e V (9 horas quando olhando para o furo) dos furos 158 e 177 são mostradas nas figuras 5 e 6 respectivamente. Nesta figura as linhas pretas representam os dados medidos e as linhas vermelhas, os dados ajustados pelos modelos que serão discutidos em breve. Ambos os furos apresentam duas respostas clássicas na interpretação qualitativa de dados BHEM. As medidas negativas da componente A do furo 158 no trecho 105 a 125 metros sugerem que o furo interceptou a borda de um condutor. Já as respostas da componente A do furo 177 sugerem que este furo interceptou o centro do condutor. A figura 7 mostra os modelos tridimensionais obtidos após o modelamento.

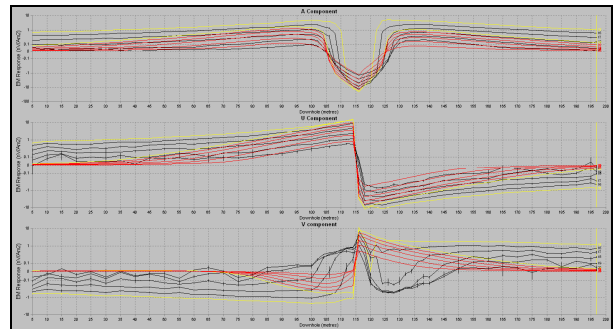


Figura 5 Resultado do BHEM no furo 158 para as três componentes (A, U e V). As linhas pretas mostram o dado medido e as linhas vermelhas as respostas do condutor ajustado.

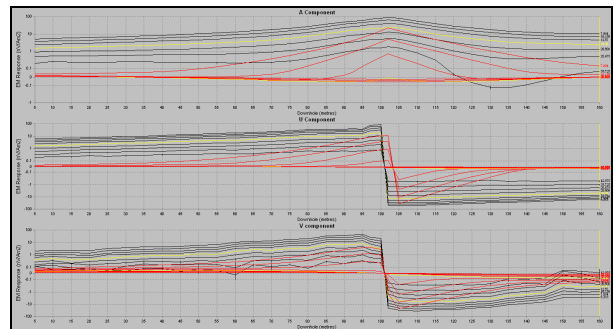


Figura 6 Resultado do BHEM no furo 177 para as três componentes (A, U e V). As linhas pretas mostram o dado medido e as linhas vermelhas as respostas do condutor ajustado.

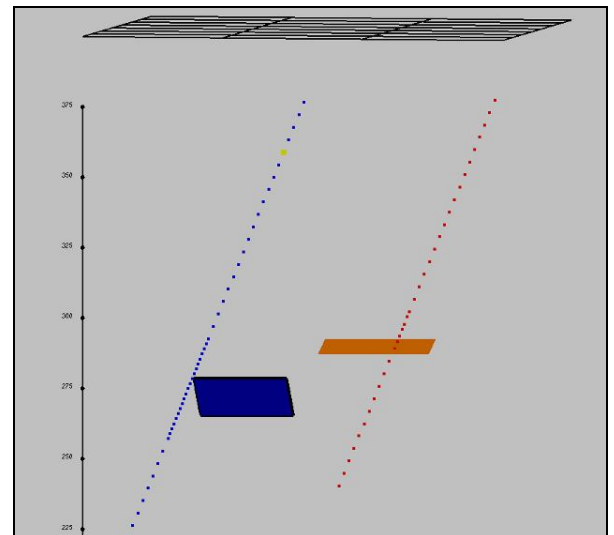


Figura 7 Visão das placas ajustadas para ambos os furos 158 (azul) e 177 (vermelho). Observe como a placa azul foi interceptada na borda pela sondagem 158.

Furos 107, 114, 131 e 133

A figura 8 mostra o resultado do furo 107 para as componentes A, U e V. Os segundos fatos são observados nas respostas BHEM em uma interpretação puramente qualitativa:

Aplicações de EM aéreo e de poço em um depósito de níquel em Goiás.

- O BHEM do furo 114 não reflete nenhum condutor interceptado e nem nas proximidades do furo.
- O furo 107 tem a resposta BHEM mais complexa, sugerindo pelo menos dois condutores, um sendo interceptado somente na borda e outro estando próximo ao condutor, mas não interceptado.
- O background negativo dos furos 131 e 133 sugerem que existe um corpo EM distante (~100 metros) de ambos os furos. Sendo que somente no furo 133 deve ter interceptado no final do furo.

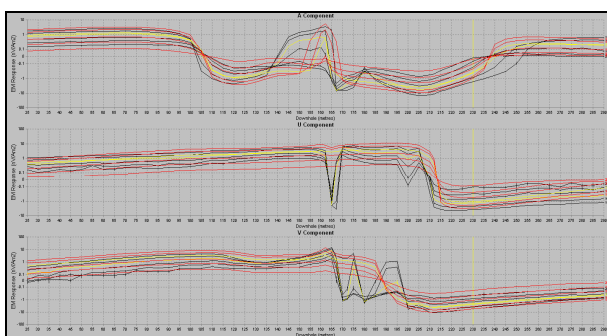


Figura 8 Resultado do BHEM no furo 107 para as três componentes (A, U e V). As linhas pretas mostram o dado medido e as linhas vermelhas as respostas do condutor ajustado.

Conforme discutido acima, a interpretação qualitativa detecta condutores perdidos, mas não aponta onde eles estão. A importância no modelamento vem neste momento, quando todos os dados são analisados simultaneamente e com a ajuda de todas as três componentes pode-se estimar onde estão os condutores não interceptados.

A visualização em três dimensões dos corpos modelados, conforme mostrado na figura 9 releva que condutores importantes não foram corretamente interceptados pelas sondagens medidas pelo BHEM, mas, muito provavelmente por outras não investigadas por BHEM. Pode-se observar que as principais placas se arranjam em dois pares paralelos entre eles. Contudo os dois grupos de pares mergulham quase opostamente.

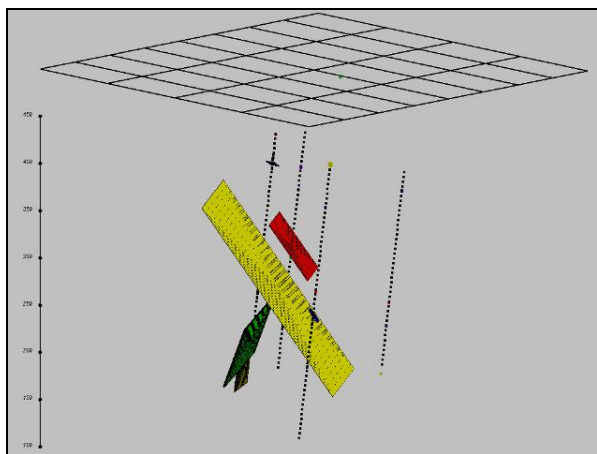


Figura 9 Visão tridimensional dos modelos obtidos após o modelamento simultâneo dos dados BHEM dos furos, 107, 114, 130 e 131.

Modelamento geológico

Os estudos de modelagem de depósitos geralmente estão baseados na interpretação geológica através de seções verticais e/ou horizontais, obtidas através dos dados de sondagem e de mapeamento de superfície.

Neste trabalho foram considerados 35 furos de sondagem, que apresentam, em sua maioria, azimute de 160° e profundidade média de 300m, num total de aproximadamente 10.700m de sondagem.

Assim, toda a área que engloba os corpos de minério foi dividida em 11 seções verticais espaçadas em 25 metros, com a projeção dos dados de sondagem, que foram então interpretadas tridimensionalmente diretamente em computador, através das ferramentas do *software Datamine Studio v.3™*.

A modelagem de superfícies em *Datamine* é feita através de Modelos Digitais de Terreno (MDT). A superfície envolvente de um corpo geológico pode ser modelada como uma malha triangulada de pontos, similar àquela utilizada para modelar superfícies por modelos tipo MDT, e o termo técnico em inglês para definir este tipo de modelo é *wireframe*, ou, em português, modelo de arames.

As superfícies são modeladas como *wireframes* por uma malha de triângulos, criada a partir de pontos tridimensionais coletados através da superfície desenhada (Henley *et al.*, 1989). Existem na literatura diversos métodos de triangulação de um conjunto de pontos tridimensionais. O sistema *Datamine* faz uso da Triangulação de Delaunay, que permite criar malhas trianguladas otimizadas e únicas para um determinado conjunto de pontos (Davis, 1986).

A modelagem considerou que os corpos de minério deste depósito possuem um controle litológico – base dos derrames – e a mineralização é interpretada como sin-vulcânica, com os corpos komatiíticos mergulhando segundo o azimute 340° e mergulho variando entre 60 e 70°. A figura 10 apresenta o produto final da modelagem geológica.

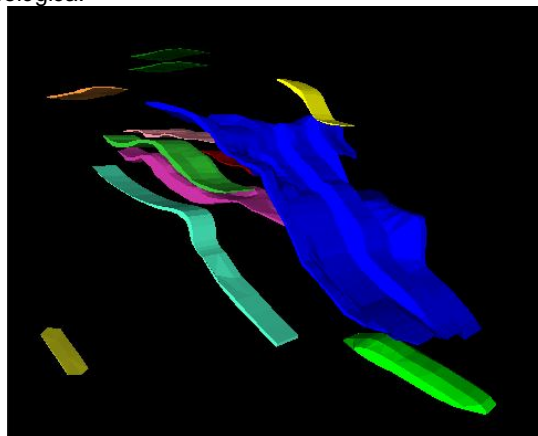


Figura 10 Modelo tridimensional para os corpos de minério.

Integração dos modelos geofísicos

Para verificar a eficácia dos métodos EM VTEM e BHEM, os modelos geofísicos obtidos foram comparados com o modelo de mineralização. É importante realçar que tanto o modelo proveniente de método aéreo como de método terrestre foram executados de forma totalmente independente do modelamento geológico do depósito.

Na figura 11 é mostrada a projeção horizontal do modelo geológico sobre a imagem VTEM BField canal de 7,8 ms. Na figura 12 é mostrado em bloco 3D o modelo geológico e o corpo EM invertido, que é mostrado também na figura 4.

A correlação entre os modelos aeroEM e geológico é muito boa. Se o levantamento fosse executado em terreno tipo *greenfield* muito provavelmente a estratégia de se voar VTEM e sondar diretamente as anomalias teria retorno positivo.

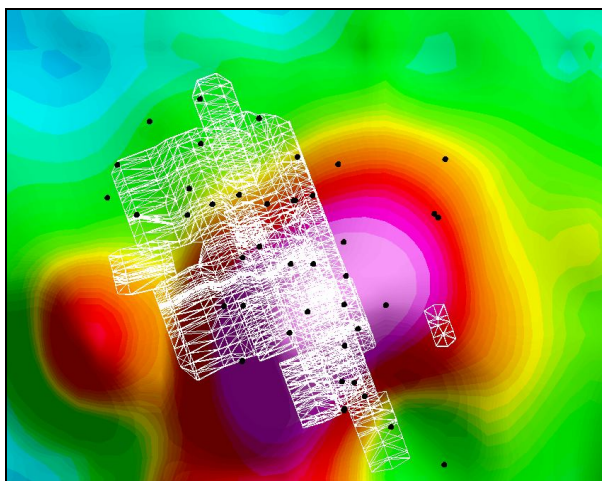


Figura 11 Projeção horizontal dos corpos mineralizados (polígonos brancos) sobreposta a imagem VTEM BField para o canal de 7.8 ms. Os pontos pretos representam as sondagens diretas executadas.

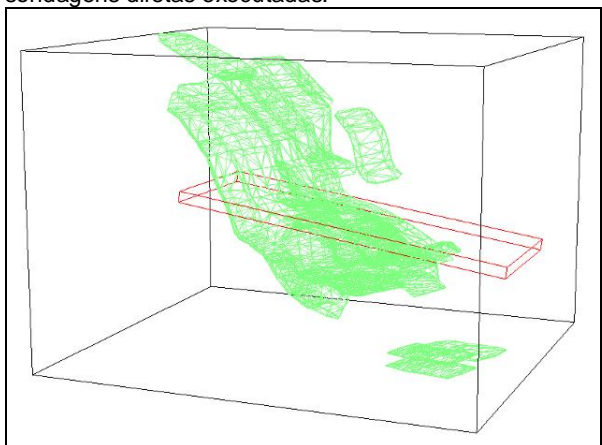


Figura 12 Integração em bloco 3D dos corpos de minério (polígonos verdes) e do corpo EM invertido (polígono vermelho) a partir dos dados VTEM.

A figura 13 mostra a integração entre as placas EM geradas a partir da inversão dos dados de BHEM e os

corpos de minério. As placas condutivas estão correlacionadas a mineralização, mostrando alguns corpos menores que são invisíveis no dado aéreo. Contudo, o mergulho preferencial dos corpos EM não corrobora com o mergulho dos corpos de minério modelados.

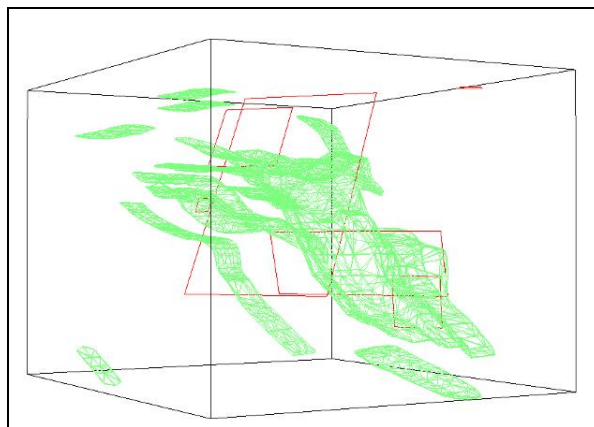


Figura 13 Integração em bloco 3D dos corpos de minério (polígonos verdes) e dos corpos EM invertidos (polígonos vermelhos) a partir dos dados de BHEM.

O modelamento do BHEM foi iniciado pelos furos 114 131 e 133 que não interceptaram mineralização. Durante a inversão de somente estes 3 furos ficava evidente que deveria haver um condutor de dimensões expressivas no quadrante SE. Quando os dados BHEM do furo 107 foram inseridos, o posicionamento do condutor no quadrante SE foi confirmado. Isto mostra a efetividade do método BHEM também no caso de uma zona *greenfield*.

Em zonas de *brownfield*, como esta do depósito, os dados de BHEM devem, mandatoriamente, serem invertidos utilizando-se ao máximo as informações dos furos e idealmente modelos de corpos de minério como apresentado aqui. Com estas informações deve-se trabalhar o modelamento geofísico e geológico paralelamente, um refinando o outro, chegando a um modelo de mineralização que se ajuste as ambas informações.

Conclusões

Os resultados dos levantamentos VTEM e BHEM sobre um depósito de níquel sulfetado previamente conhecido em Goiás revelaram que ambas as metodologias foram capazes de indicar a localização dos principais corpos mineralizados.

A comparação entre os modelos de minérios e o modelo EM a partir do VTEM, gerados em separado e por grupos distintos, reforça que a metodologia de se sondar diretamente anomalias VTEM sem *follow-up* terrestre é viável. Contudo, a correta definição da separação entre linhas e direção de vô são críticas no sucesso desta metodologia.

A comparação entre o modelo de blocos de minério e os modelos do BHEM, também conduzidos de forma independente, gerou resultados interessantes. Os três furos estéreis quando levantados por BHEM indicaram

Aplicações de EM aéreo e de poço em um depósito de níquel em Goiás.

que haveria um corpo condutor na posição aproximada do depósito. Contudo, ficou claro que o modelamento dos dados de BHEM sem as informações dos furos fica limitado, trazendo informações importantes somente em áreas com poucos furos. Necessariamente, deve-se conduzir o modelamento BHEM utilizando-se todas as informações de furos para refinar o modelo geológico e auxiliar no modelamento geológico do depósito.

A previsão da localização dos corpos de minério pelos métodos EM discutidos aqui reforçam a importância dos métodos eletromagnéticos na pesquisa de sulfetos maciços. Os avanços recentes nesta tecnologia permitem que a pesquisa de sulfetos maciços seja mais barata ao se reduzir os custos de *follow-up* terrestre. Outro ponto importante é o dinamismo que tais dados gera no projeto de exploração, rapidamente pode-se definir as áreas de interesse prospectivo e descartar as áreas sem potencial.

Agradecimentos

Os autores agradecem a VOTORANTIM METAIS por disponibilizar os dados e permitir a publicação deste artigo.

Referências

- Davis, J.C. & McCullagh, M.J. (orgs.) 1975. Display and analyses of spatial data, New York, John Wiley, 38-53 p.
- Henley, S., Wheeler, A.J., Howe, J.H., Tucker, D.K. 1989. Computer assisted evaluation and planning of quarries. In: Proceedings of the XXI Apcom, SME of AIME, Denver
- Hill, R. E. T. 2001. Komatiite volcanology, volcanological setting and primary geochemical properties of komatiite-associated nickel deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 1, pp. 365–381.
- Leshner, C. M., 1989, Komatiite-associated nickel sulfide deposits. *Reviews in Economic Geology* 4. Economic Geology Publishing Company, El Paso, pp. 45-101.
- Macmulllan S.R. and Mclellan W.H., 1997. Measured Is Better. *Proceedings of Exploration 97. Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, p. 873-876.
- Naldrett, A.J. 1989. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York: Clarendon Press-Oxford University Press. 186 p.

Eduardo Henrique, Saulo Batista de Oliveira, Allan Fruchting, João Henrique Boniatti e Gustavo Diniz Oliveira