

EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO DADOS DE AEROGRAVIOMETRIA GRAVIMÉTRICA 3D-FTG E AEROMAGNETOMETRIA NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, BRASIL

Marco Antonio Braga¹, Dionísio Uendro Carlos¹, Yaoguo Li² e Misac Nabighian³

Recebido em 28 maio, 2009 / Aceito em 19 novembro, 2009
Received on May 28, 2009 / Accepted on November 19, 2009

ABSTRACT. This research shows a geological interpretation with focus on iron ore exploration using 3D-FTG airborne gravity gradiometry and airborne magnetic data acquired at Baú-Gandarela region, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State, Brazil. The main idea was to establish priorities for hematite prospection in the region cited above. Towards this study was possible to optimize the core drilling, delimiting the best areas for iron ore mineralization, saving economical resources.

Keywords: 3D-FTG airborne gravity gradiometry, magnetometry, iron ore.

RESUMO. Este trabalho de pesquisa apresenta uma interpretação geológica com foco na exploração de minério de ferro utilizando dados de aeromagnetometria e aerograviometria gravimétrica 3D-FTG coletados na área do Baú-Gandarela no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. A idéia principal foi estabelecer prioridades para prospecção de hematita na região supracitada. Com este estudo foi possível otimizar a sondagem, delimitando as áreas mais propensas à mineralização do minério de ferro, economizando substanciais recursos econômicos.

Palavras-chave: aerograviometria gravimétrica 3D-FTG, magnetometria, minério de ferro.

¹Vale – Gerência de Exploração Mineral de Ferrosos – GAEMF, Av. de Ligação, 3580, Águas Claras, Centro de Tecnologia de Ferrosos, 34000-000 Nova Lima, MG, Brasil. Tel.: +55(31) 3215-4200 – E-mails: marco.antonio.braga@vale.com; dionisio.carlos@vale.com

²Colorado School of Mines – Associate Professor of Geophysics, Department of Geophysics, Director of CGEM, Golden, Colorado 80401, USA – E-mail: ygli@mines.edu

³Colorado School of Mines – Distinguished Senior Scientist, Department of Geophysics, Golden, Colorado 80401, USA – E-mail: mnabighian@gmail.com

INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem o objetivo de mostrar a interpretação dos dados geofísicos produzidos e utilizá-los para otimizar a locação dos furos de sondagem para a prospecção de hematita e itabiritos ricos, tendo como base o mapa geológico (Fig. 1a) da região do Baú-Gandarela. Para isso utilizaremos os mapas da componente T_{zz} de aerogravimetria gravimétrica corrigido com MDT a laser (Fig. 1c) e SRTM, o mapa de sinal analítico (Fig. 1b) de aeromagnetometria e o mapa pseudo-litológico (Fig. 1d).

Restringindo a área de exploração do minério, com “checks de campo” pré-determinado, a pesquisa ganha tempo, os alvos para sondagem serão otimizados e com isso reduziremos os custos dos projetos.

Os itabiritos existentes na região contêm alto teor de magnetita que é um mineral ferromagnético e possui elevada magnetização. Já a hematita da região do Baú-Gandarela é antiferromagnética e possui densidade de $4,7 \text{ g/cm}^3$, sendo que seu contraste de densidade em relação às rochas encaixantes varia de $1,5$ a $2,1 \text{ g/cm}^3$. Dadas as características do minério que estamos pesquisando, acreditamos que aplicaremos os métodos mais eficazes para sua detecção, pois conseguiremos identificar as hematitas que apresentam alta densidade e baixa suscetibilidade magnética.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Geologia regional

O Quadrilátero Ferrífero (QF) está inserido na Província São Francisco, como pode ser observado na Figura 2, situando-se no extremo sul da área ocupada pelo cráton de mesmo nome e corresponde a um fragmento crustal poupado, em parte, da Orogênese Brasileira, o qual abriga em seus domínios jazidas de ferro, ouro e outros recursos minerais (Almeida, 1977; Almeida & Hassuy, 1984).

Estratigrafia

As unidades litoestratigráficas que integram o Quadrilátero Ferrífero são: os Complexos Metamórficos, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (Fig. 3). Localmente ocorrem bacias terciárias como Fonseca e Gandarela (Alkmim & Marshak, 1998).

O Supergrupo Minas representa uma seqüência metassedimentar de idade paleoproterozóica constituída por filitos, xistos, quartzitos, dolomitos e itabiritos, assentada discordantemente sobre rochas do embasamento ou do Supergrupo Rio das Velhas (Derby, 1906; Harder & Chamberlin, 1915; Guimarães, 1931,

1951; Lacourt, 1936; Dorr, 1969; Ladeira, 1980; Marshak & Alkmim, 1989; Chemale Jr et al., 1991; Alkmim & Marshak, 1998).

O Grupo Itabira constitui a seqüência química intermediária, sendo também dividido em duas formações: Cauê e Gandarela. A Formação Cauê está na base do grupo e é formada quase que exclusivamente por itabiritos e mineralizações ricas em hematita, sendo explotada como minério de ferro. Estes itabiritos podem ser diferenciados pela mineralogia, granulometria e composição química. Na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, devido aos dobramentos e falhamentos, em regime de encurtamento crustal, os itabiritos têm grande volume. Acima e em contato gradacional está a Formação Gandarela constituída por dolomito, formação ferrífera, marga, filito dolomítico e filito.

Área do levantamento geofísico

Localização

Os levantamentos aerogeofísicos magnetométrico e 3D-FTG foram realizados na aba sul do Sinclinal Gandarela que está situado na região leste do Quadrilátero Ferrífero (Fig. 4), nos municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais, estado de Minas Gerais, aproximadamente a 120 km de Belo Horizonte.

A área dos levantamentos geofísicos 3D-FTG e magnetometria (Fig. 4) recobre rochas mapeadas como sendo do Supergrupo Minas e do Supergrupo Rio das Velhas.

O Supergrupo Minas é o alvo principal desta prospecção, pois nele se encontram as hematitas e itabiritos da Formação Cauê do Grupo Itabira.

O mapa geológico da região do Baú-Gandarela contém o detalhamento das litologias que compõem os Grupos Itabira, Piracicaba e Caraça, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, Modelo de Dorr (1969) (Figs. 3 e 5).

Segundo medições de susceptibilidade magnética e densidade realizadas no laboratório da Vale a hematita da região do Baú-Gandarela é antiferromagnética e possui densidade de $4,7 \text{ g/cm}^3$, sendo que seu contraste de densidade para com as rochas encaixantes varia de $1,5$ a $2,1 \text{ g/cm}^3$.

MATERIAIS E MÉTODOS

Planejamento da aquisição de dados

A Figura 6 apresenta o mapa topográfico da região do Baú-Gandarela com as linhas de vôo do levantamento de aerogravimetria gravimétrica e magnetometria, as mesmas foram orientadas na direção NE-SW. A altura do vôo foi de 80 metros, com espaçamento entre linhas de aproximadamente 100 metros, visando mapear as mineralizações de hematita, em um total de

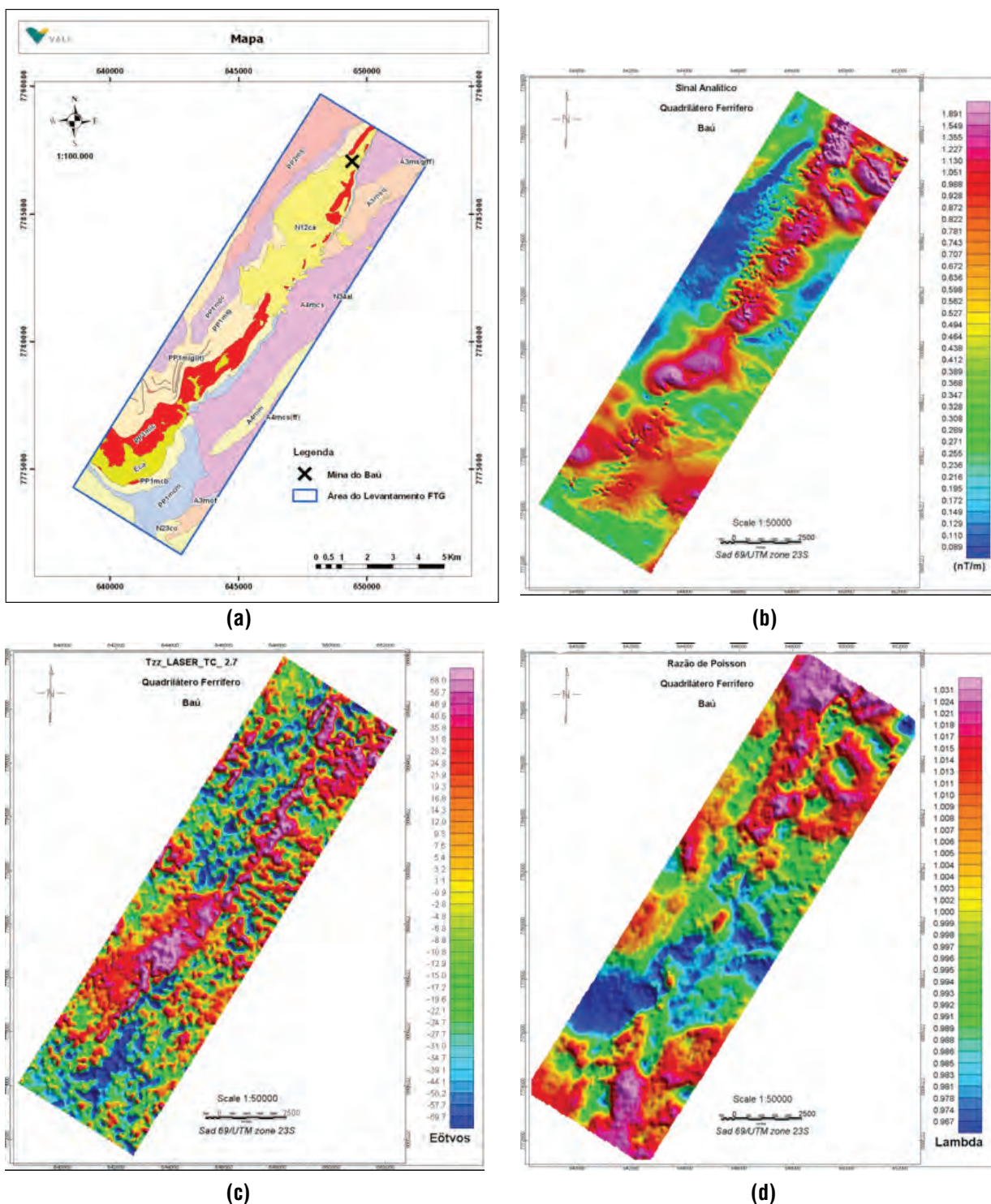


Figura 1 – Mapa geológico da região do Baú-Gandarela (a), mapa de sinal analítico do campo magnético total (b), componente T_{zz} da aerogravimetria gravimétrica (c), e mapa pseudo-litológico (d).

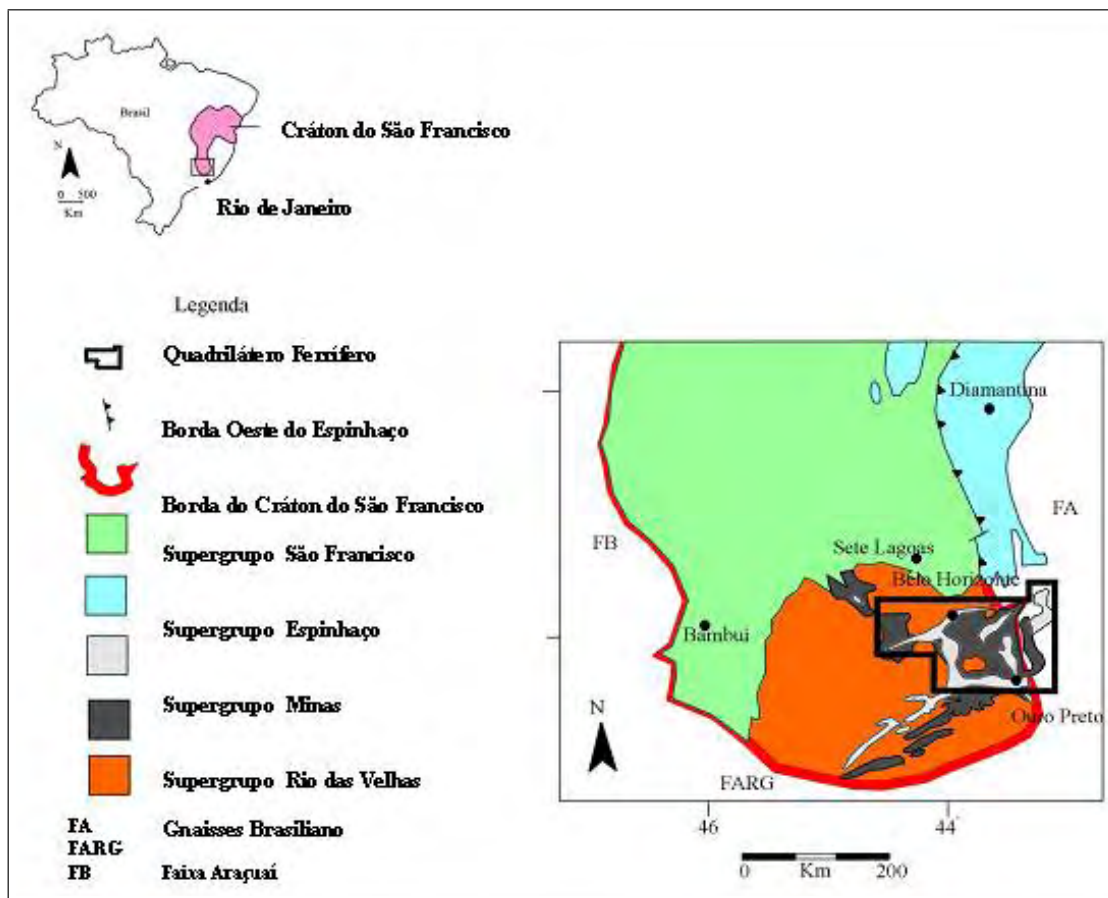


Figura 2 – Mapa de situação, mostrando a inserção do Quadrilátero Ferrífero na porção meridional do Cráton do São Francisco (Marshak & Alkmim, 1989).

54 linhas levantadas que recobriram 927 km e aproximadamente 93 km². Foi empregada uma aeronave Caravan C-208, com velocidade de cruzeiro de 300 km/h e velocidade em operação geofísica de 260 km/h.

Interpretação dos dados geofísicos

A Figura 7 apresenta o mapa geológico com transparência nas áreas da cobertura de canga (N12ca e Eca) sobre o mapa da componente T_{zz} de aerogradiometria gravimétrica corrigido com modelo digital do terreno a laser. Como pode ser observado, as coberturas de canga (N12ca e Eca, Fig. 7) mapeadas no mapa geológico da região do Baú-Gandarela são muito extensas, o que dificulta a prospecção e locação da sondagem geológica na área recoberta por esse material.

Nota-se que a área potencial para prospecção de hematita, representada pela cor magenta no mapa do T_{zz} (Fig. 8), é bem menor que a área coberta pela canga, o que facilitará a prospecção do minério, reduzindo custos com a locação da sondagem na região.

Com base nos mapas de sinal analítico (Fig. 9a), imagem satélite (Fig. 9b), componente T_{zz} (Fig. 9c) e mapa pseudo-litológico (Fig. 9d), avaliamos a “assinatura” da Mina do Baú e das áreas do Pião e Vigário da Vara no Sinclinal Gandarela (QF).

Na Mina do Baú marcada com símbolo em 10(a), a assinatura magnética (anomalia) 10(b) da mina deve-se as mineralizações de itabiritos ricos em magnetita. A área da mina onde concentram-se as mineralizações de hematita compacta não estão bem definidos no mapa de sinal analítico.

Os limites do depósito de ferro da Mina do Baú (Fig. 11b) são muito bem delimitados na componente T_{zz} (Fig. 11a) assim como no mapa pseudo-litológico (Fig. 11c).

As mineralizações de hematita compacta e hematita friável da região do Morro do Pião não aparecem no mapa de sinal analítico. A assinatura magnética (anomalia) na região deve-se as mineralizações de itabiritos ricos em magnetita (Fig. 12a e 12b).

Os limites da formação ferrífera rica em hematita na região do Pião são delimitados na componente T_{zz} (Fig. 13a). A Fi-

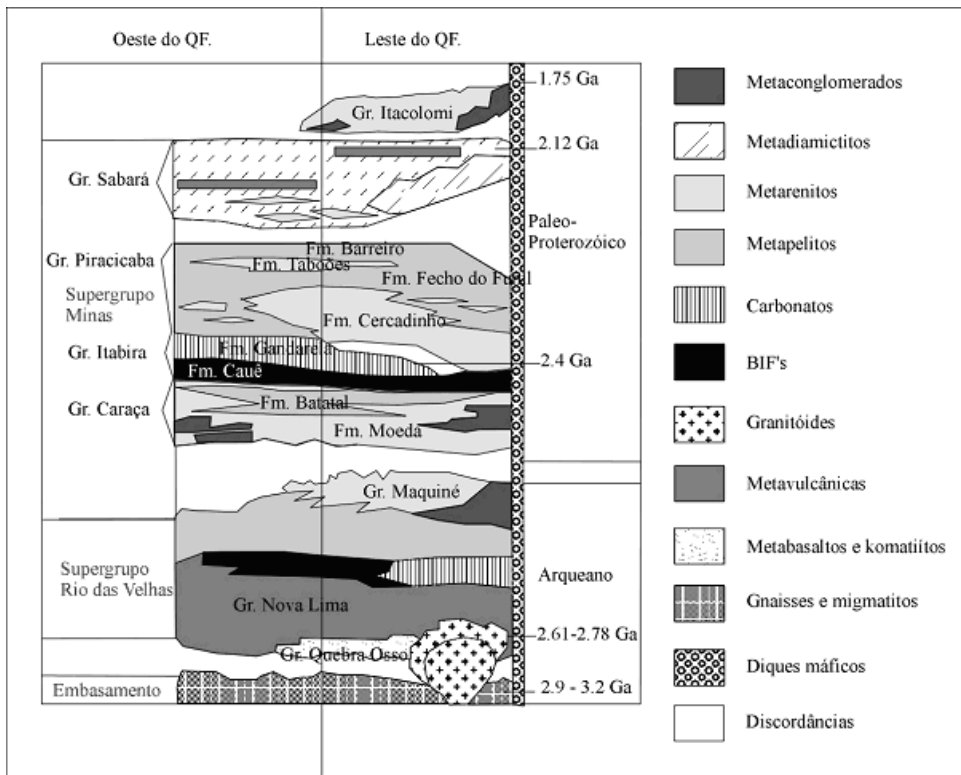


Figura 3 – Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak, 1998).

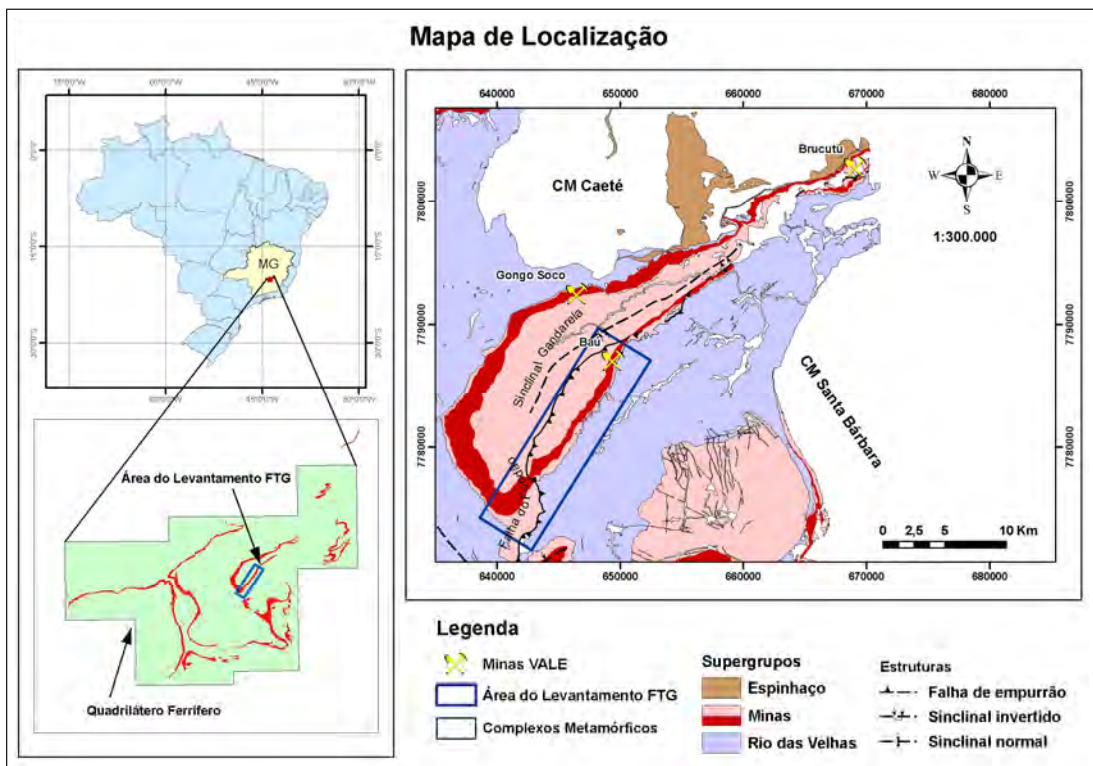


Figura 4 – Mapa de localização da área dos levantamentos geofísicos 3D-FTG e magnetometria.

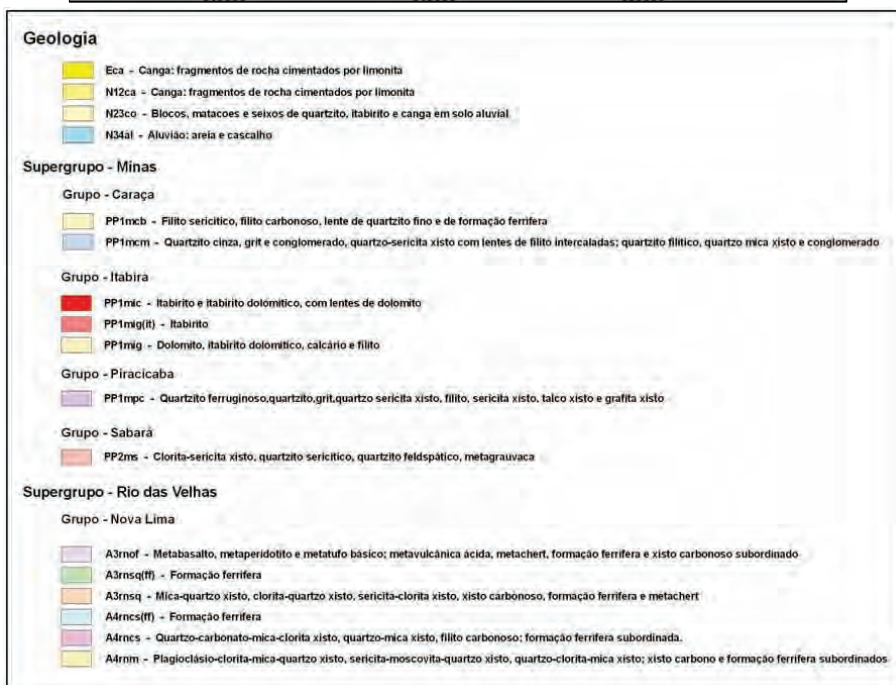
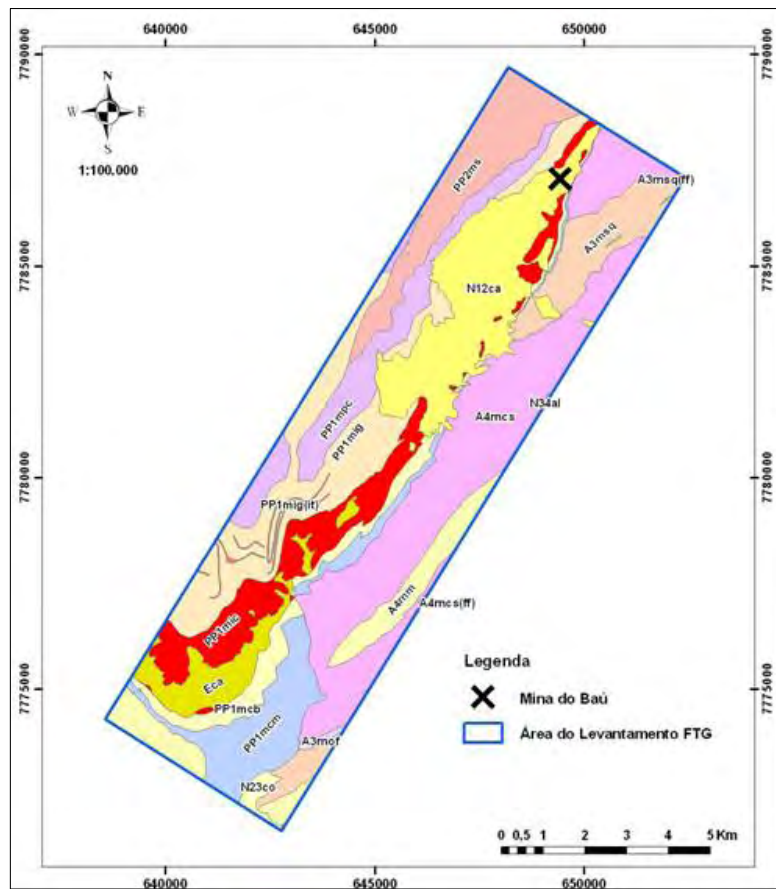


Figura 5 – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela, contendo o detalhamento das litologias que compõem as Formações dos Grupos Carajá, Itabira e Piracicaba, e as litologias do Supergrupo Rio das Velhas, onde foi realizado o levantamento geofísico 3D-FTG, modelo de Dorr (1969).

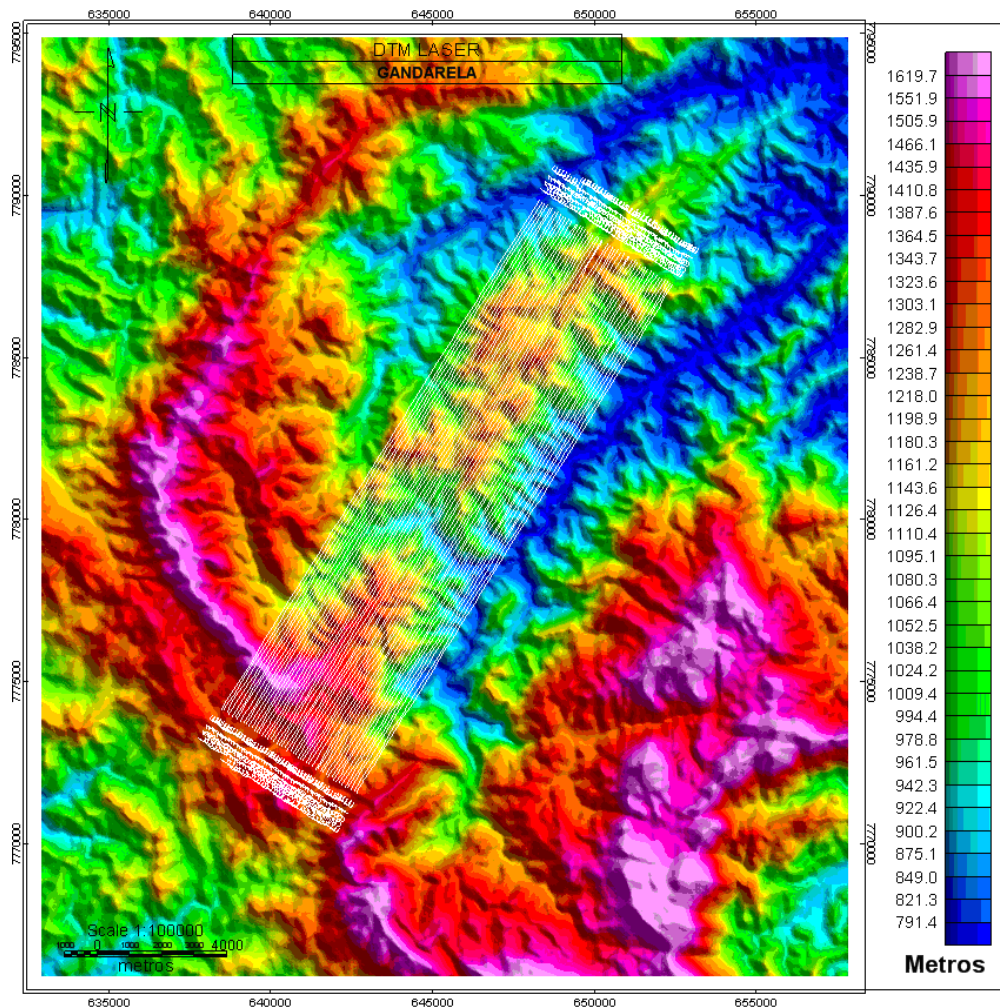


Figura 6 – Mapa topográfico com a posição das linhas de voo do levantamento geofísico de aeroradiometria gravimétrica 3D-FTG e magnetometria na região do Baú-Gandarela, as linhas foram orientadas na direção NE-SW com espaçamento entre linhas de aproximadamente 100 metros totalizando 54 linhas de voo.

gura 13b apresenta a localização das mineralizações de hematita e uma idéia da topografia da região. O mapa pseudo-litológico (Fig. 13c) também delimita muito bem a área propícia a prospecção de hematita.

A região do Vigário da Vara tem uma grande área de cobertura de canga (Figs. 14a e 14b) que não possui assinatura magnética no mapa de sinal analítico (Fig. 14c), a assinatura magnética na região deve-se a poucas mineralizações de itabiritos ricas em magnetita.

A resposta da componente T_{zz} (Fig. 15a) na região do Vigário da Vara (Fig. 15b) mostra pouco potencial para hematita compacta, porém o sinal é compatível com o sinal da hematita friável na área coberta por canga (linha preta). O mapa pseudo-litológico (Fig. 15c) também mostra que a área coberta por canga não é propícia à prospecção de hematita compacta.

Com base nos resultados anteriores sugerimos uma programação de sondagem para a região do Baú-Gandarela (Fig. 16) com a intenção de otimizar os resultados da prospecção de minério de ferro rico e também descartar as regiões onde o mesmo não aparece segundo os dados geofísicos coletados.

A programação de sondagem geofísica para a região do Baú-Gandarela, se deu basicamente em função da componente T_{zz} corrigida com MDT a laser e densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Fig. 17). As regiões com cobertura de canga (linha preta) basicamente não apresentam anomalias associadas a presença de hematita.

Para efeito comparativo o mapa da Figura 18 mostra a programação de sondagem que seria executada na região sem a análise prévia dos dados geofísicos. É possível perceber que na região coberta pela canga, uma sondagem muito além do necessário seria utilizada, pois não teríamos nenhum indicativo da existência

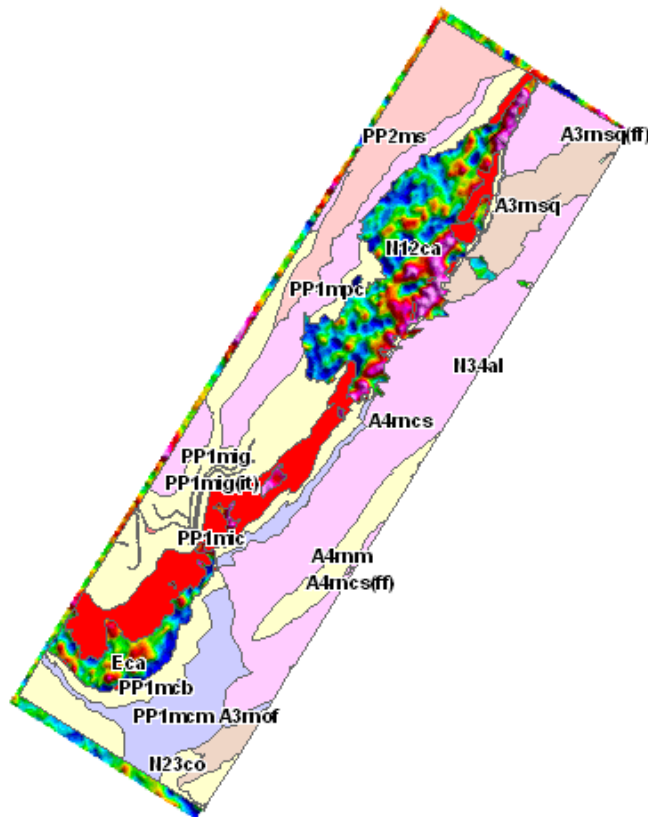


Figura 7 – Mapa geológico com transparência na cobertura de canga sobre o mapa da componente T_{zz} .

ou não de hematitas, enquanto que algumas regiões onde estão as anomalias geofísicas da componente T_{zz} (Fig. 19) não seriam sondadas.

A disposição da sondagem anteriormente programada pela geologia comparada com a programação de sondagem geofísica pode ser visualizada na Figura 20. Foram programados 188 furos de sondagem pela geologia e 133 furos de sondagem pela geofísica. É possível perceber a diferença na locação dos furos entre as programações de sondagem. A programação geofísica é mais precisa, principalmente na região com cobertura de canga.

Um total de 109 furos de sondagem tinham sido locados com base no mapa geológico na região com cobertura de canga, desses, 60 não precisarão ser realizados e 49 furos foram realocados em função da geofísica (Fig. 21).

Levando-se em consideração que o valor do metro da sondagem custa em média US\$ 150,00 e que cada furo na região do Baú-Gandarela terá 150 metros de extensão, estamos gerando uma economia de US\$ 2.452.500,00 e valorizando a informação do depósito de ferro com a realocação precisa da sondagem. Comparativamente, o custo do levantamento geofísico 3D-FTG na região do Baú-Gandarela foi de US\$ 83.000,00.

CONCLUSÃO

Quanto à interpretação geológica dos mapas geofísicos fica claro que o mapa da componente T_{zz} 2,7 g/cm³ corrigido com MDT a laser é o mapa que melhor define a formação ferrífera na região do Baú-Gandarela, evidenciando com precisão a continuidade da formação ferrífera sob a canga assim como as mineralizações com alto teor de ferro. Os resultados dos dados de magnetometria não obtiveram o mesmo sucesso, pois só detectam as formações ferríferas magnéticas.

Com base nos mapas geofísicos foi possível estabelecer uma malha de sondagem exploratória para confirmar ou não a existência de formação ferrífera rica na área do Baú-Gandarela. Um total de 109 furos de sondagem foram locados com base no mapa geológico na região com cobertura de canga, desses, 60 não precisarão ser realizados e 49 furos foram realocados em função da geofísica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A., especialmente à Diretoria de Ferrosos pela oportunidade de publicação deste trabalho.

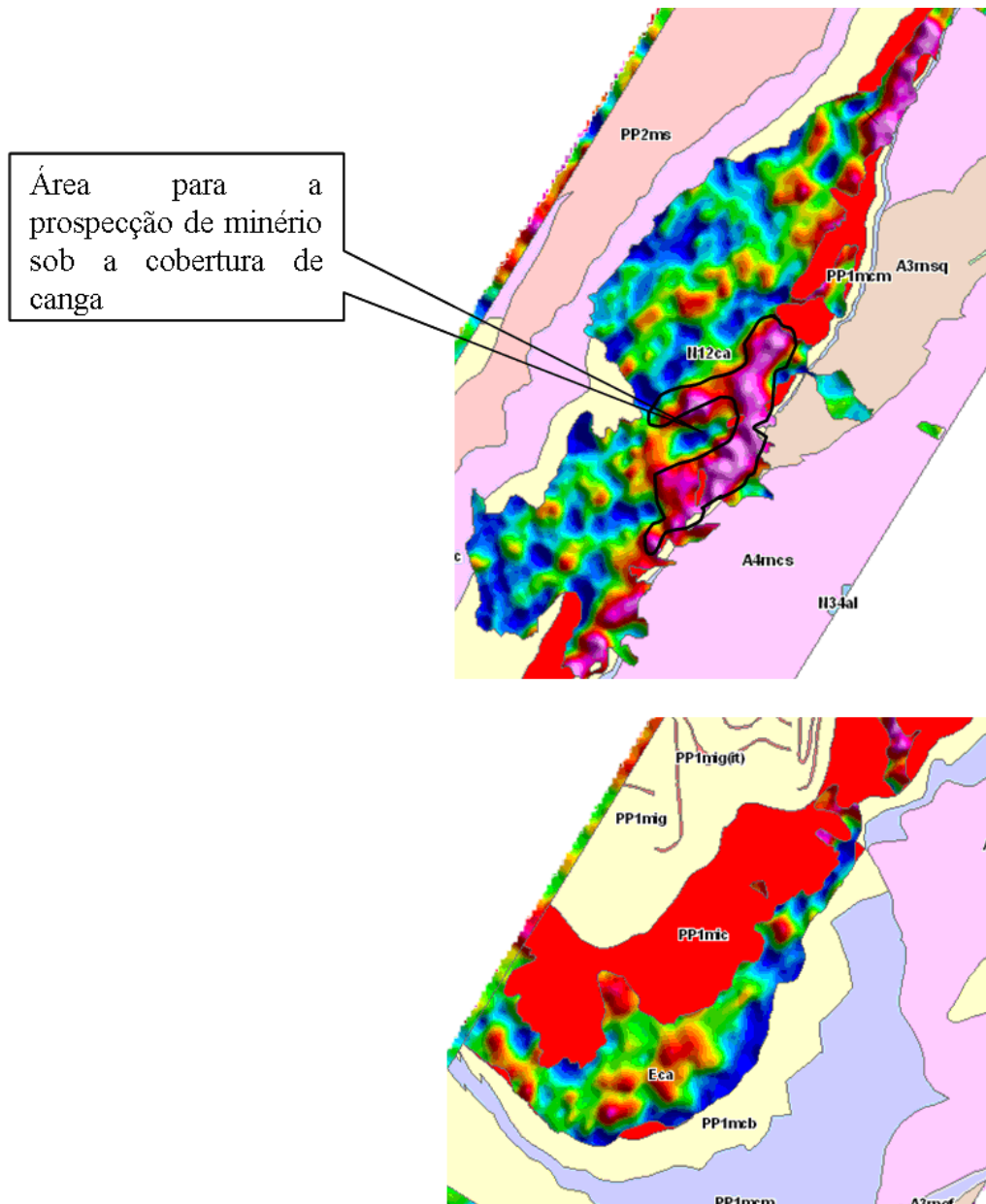


Figura 8 – Mapa geológico com transparência na cobertura de canga sobre o mapa da componente T_{zz} . A área potencial para prospecção de hematita é representada pela cor magenta no mapa do T_{zz} .

REFERÊNCIAS

- ALKMIM FF & MARSHAK S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29–58.
- ALMEIDA FFM. 1977. O Crátão do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349–364.
- ALMEIDA FFM & HASSUY Y (Coords.). 1984. *O Precambriano do Bra-*

sil. São Paulo. Edgard Blücher. 542 p.

- CHEMALE JR F, ROSIÈRE CA & ENDO I. 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Um modelo. *Revista Pesquisas – UFRGS*, 18(2): 104–127.
- DERBY OA. 1906. The Serra of Espinhaço. *Journ. Geol.*, 14: 374–401.
- DORR JVN. 1969. Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, DNP/USGS/ 109p. (Prof. Paper 641-A).

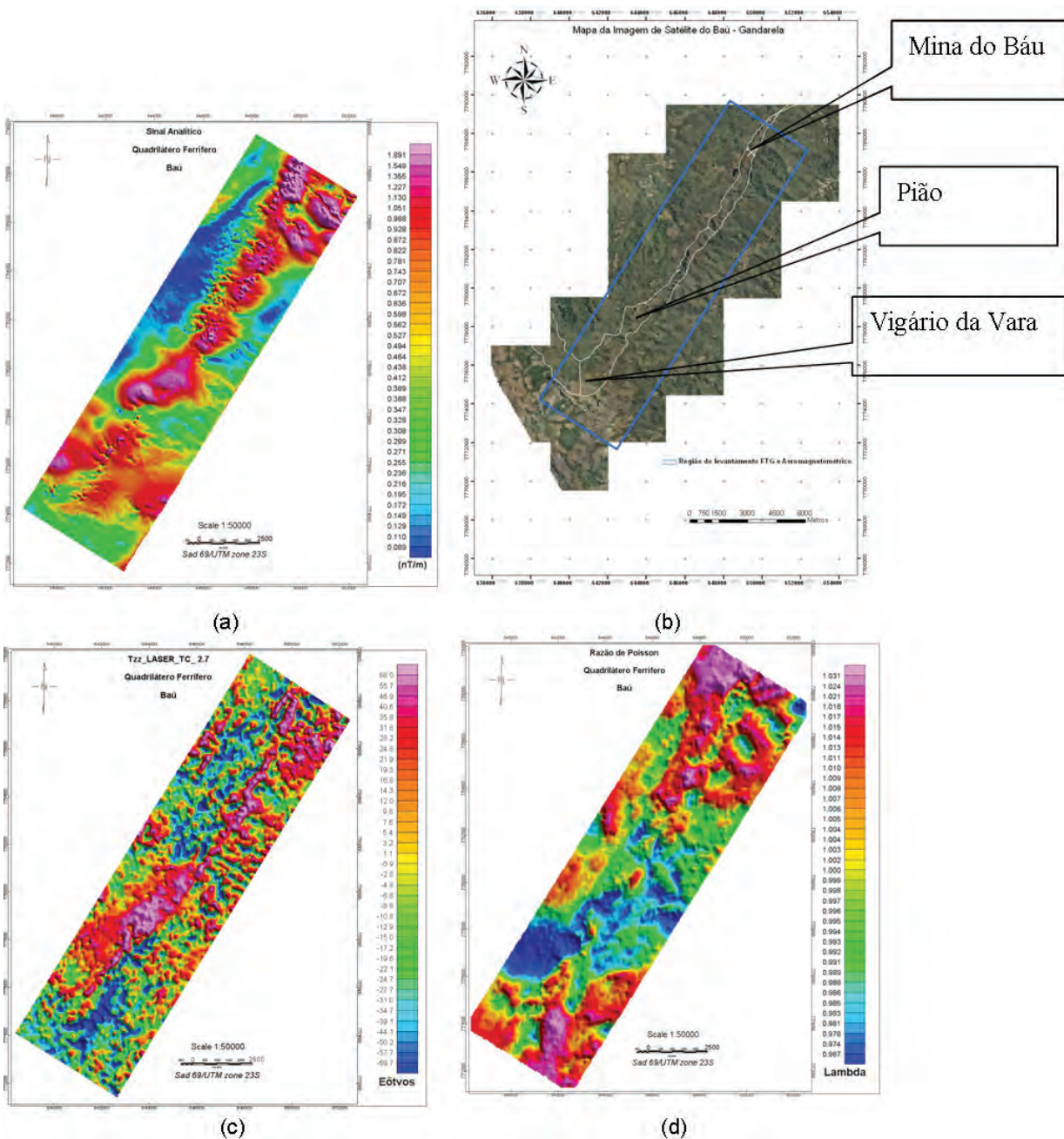


Figura 9 – Mapas de sinal analítico (a), imagem de satélite (b), componente T_{zz} (c) e mapa pseudo-litológico (d) da região do Baú-Gandarela.

GUIMARÃES D. 1931. Contribuição à geologia do Estado de Minas Gerais, Brasil. Dept. P.M., Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Bol., 55: 36 p.

GUIMARÃES D. 1951. Arqui-Brasil e sua evolução geológica. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Boletim 88, 314 p.

HARDER EC & CHAMBERLIN RT. 1915. The geology of central Minas Gerais, Brazil. Journal of Geology, 23: 341–378.

LACOURT F. 1936. Resumo da geologia da Folha de Ouro Preto. Anais

Esc. Minas de Ouro Preto, 27: 47 p.

LADEIRA EA. 1980. Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ontário. Universidade de Ontário, Canadá. Tese de doutoramento. 272 p.

MARSHAK S & ALKIMIM FF. 1989. Proterozoic Contractions/Extension tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brasil. Tectonics, 8(3): 555–571.

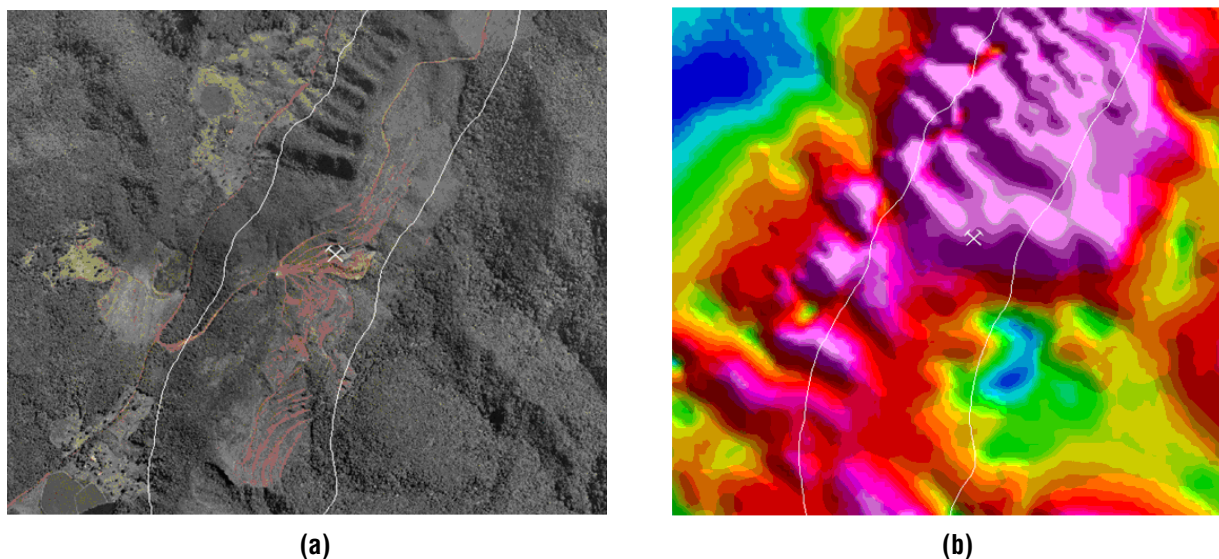


Figura 10 – Imagem de satélite (a) e mapa de sinal analítico do campo magnético da Mina do Baú (b). A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região.

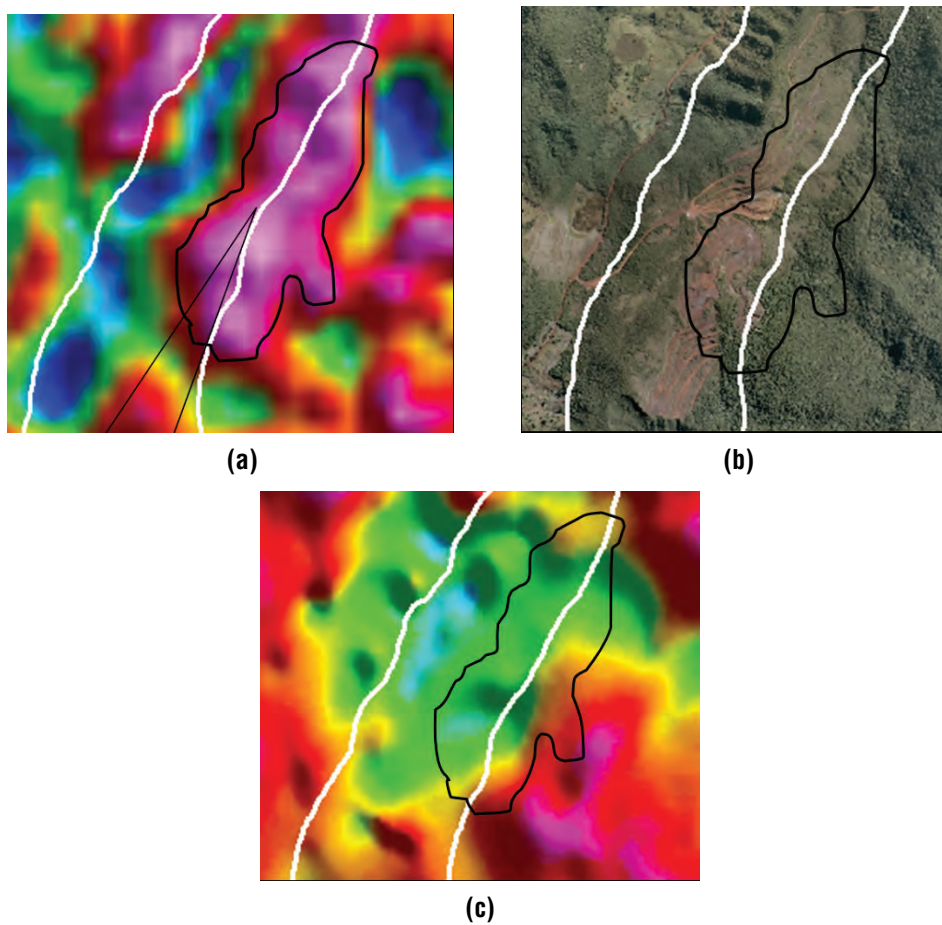


Figura 11 – Componente T_{zz} (a), imagem de satélite da Mina do Baú (b) e mapa pseudo-litológico (c). A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região e a linha preta os limites da Mina do Baú.

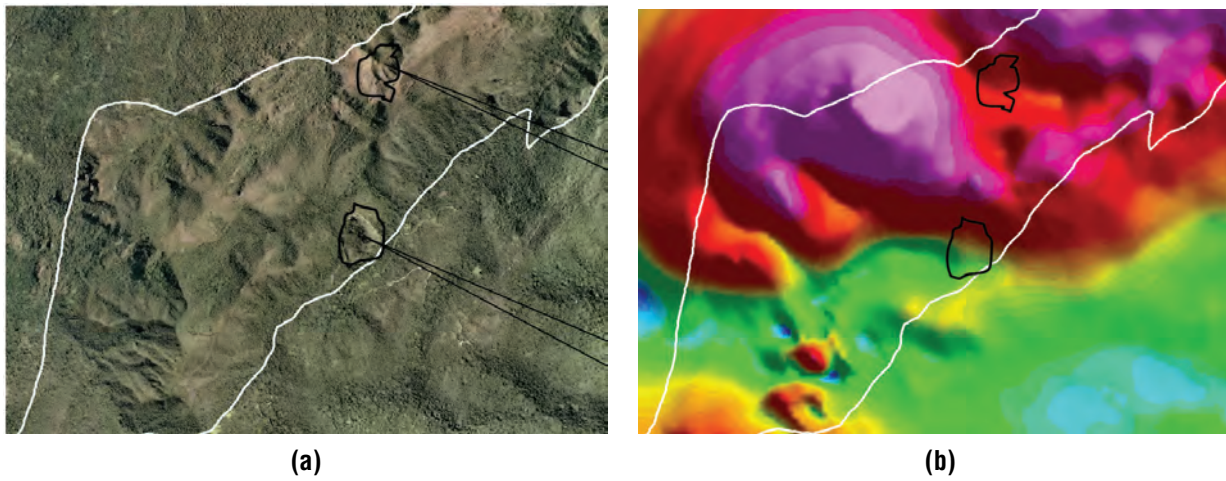


Figura 12 – Imagem de satélite das mineralizações ricas em hematita friável e compactada da região do Pião (a) e mapa de sinal analítico da região do Pião (b). A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região.

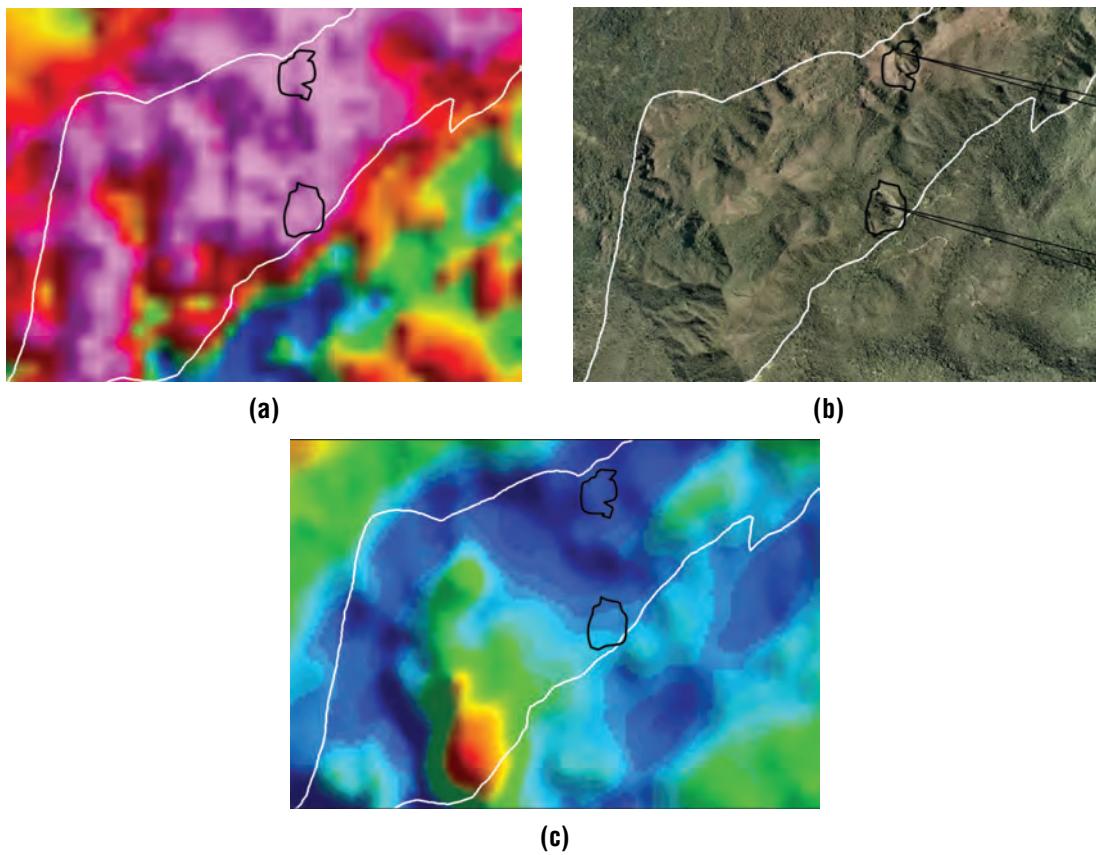


Figura 13 – Componente T_{zz} (a), imagem de satélite das mineralizações ricas em hematita friável e compactada da região do Pião (b) e mapa pseudo-litológico (c). A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região.

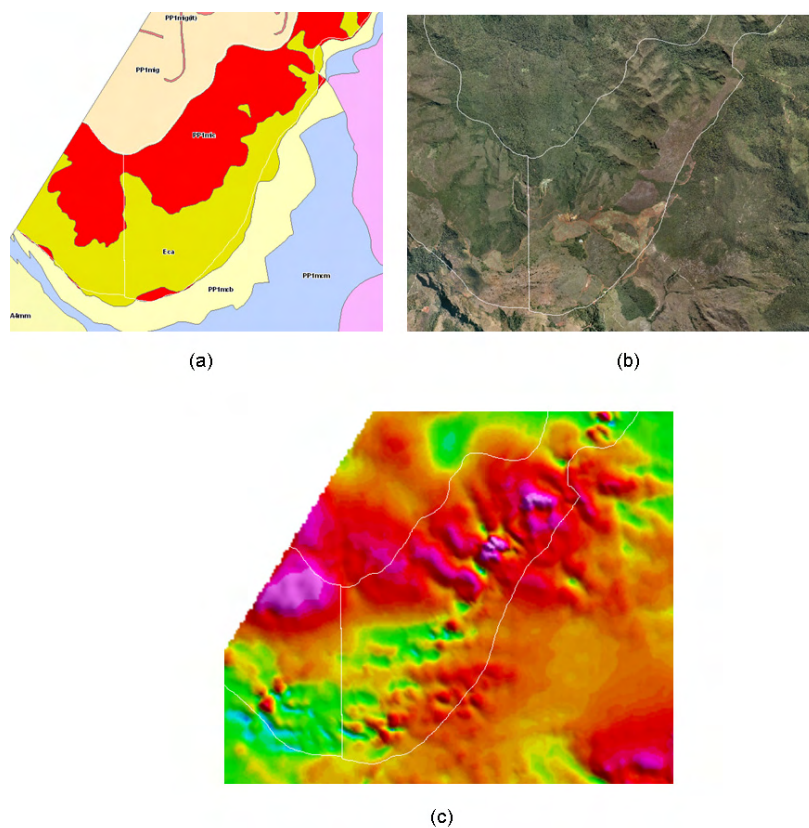


Figura 14 – Mapa litológico (a), imagem de satélite (b) e mapa de sinal analítico (c) da região do Vigário da Vara. A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região.

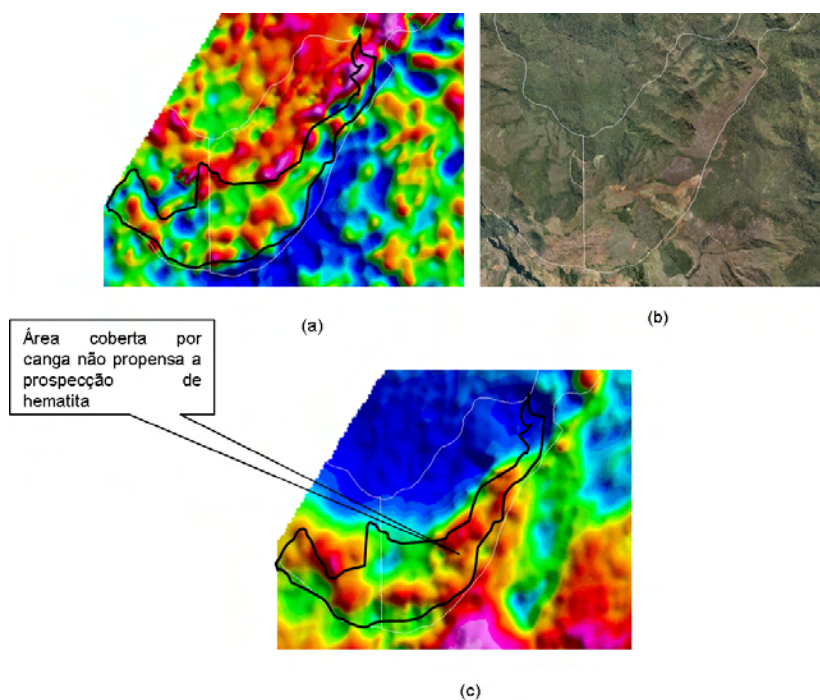


Figura 15 – Componente T_{zz} (a), imagem de satélite da região do Vigário da Vara (b) e mapa pseudo-litológico (c). A linha branca representa os limites da formação ferrífera mapeada na região. A linha preta representa a região com cobertura de canga.

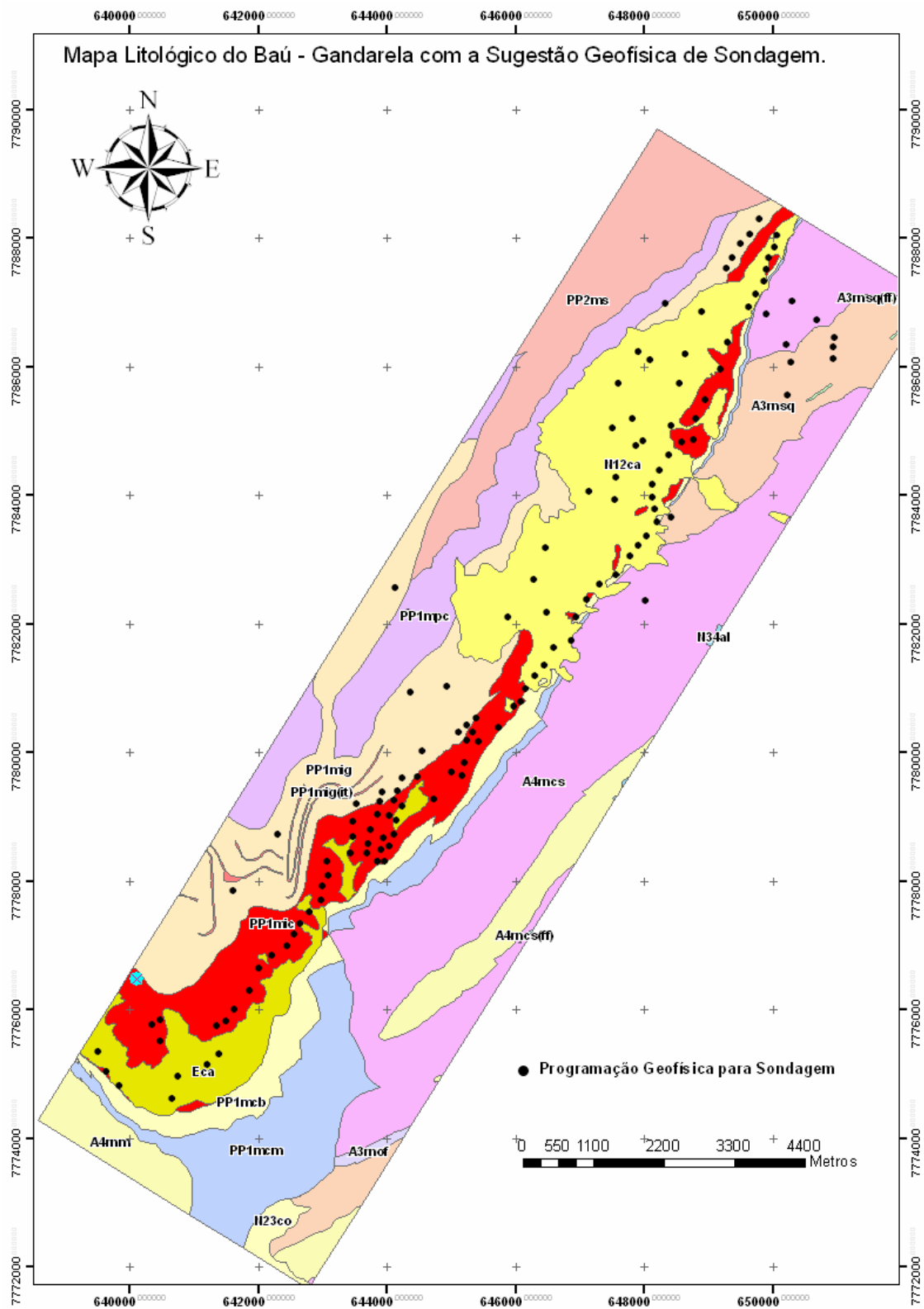


Figura 16 – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela com a programação de sondagem baseada nas interpretações dos dados de aerogeofísica.

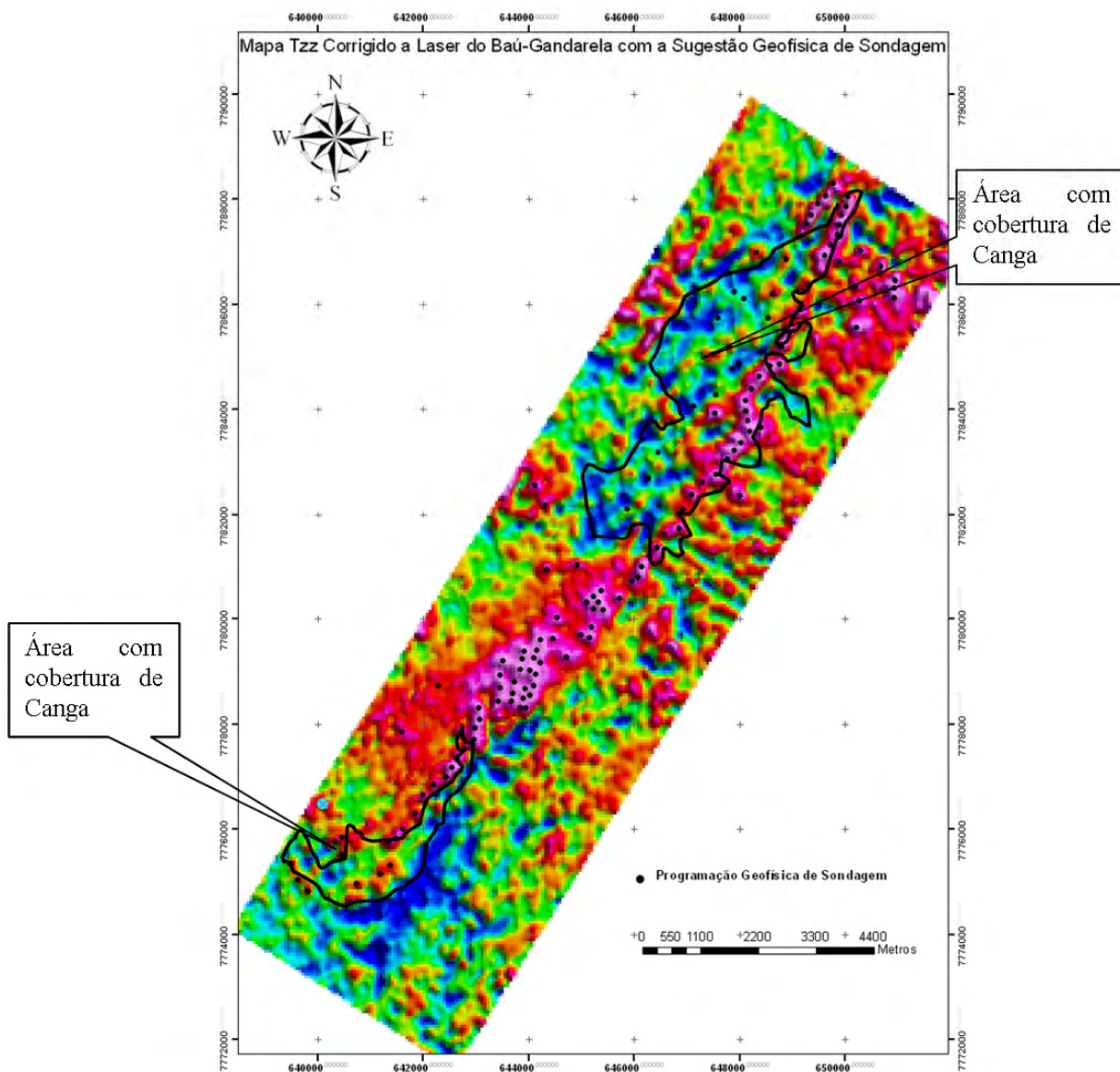


Figura 17 – Mapa da componente T_{zz} corrigida com MDT a laser e densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$ da região do Baú-Gandarela com a programação de sondagem baseada nas interpretações dos dados de aerogeofísica.

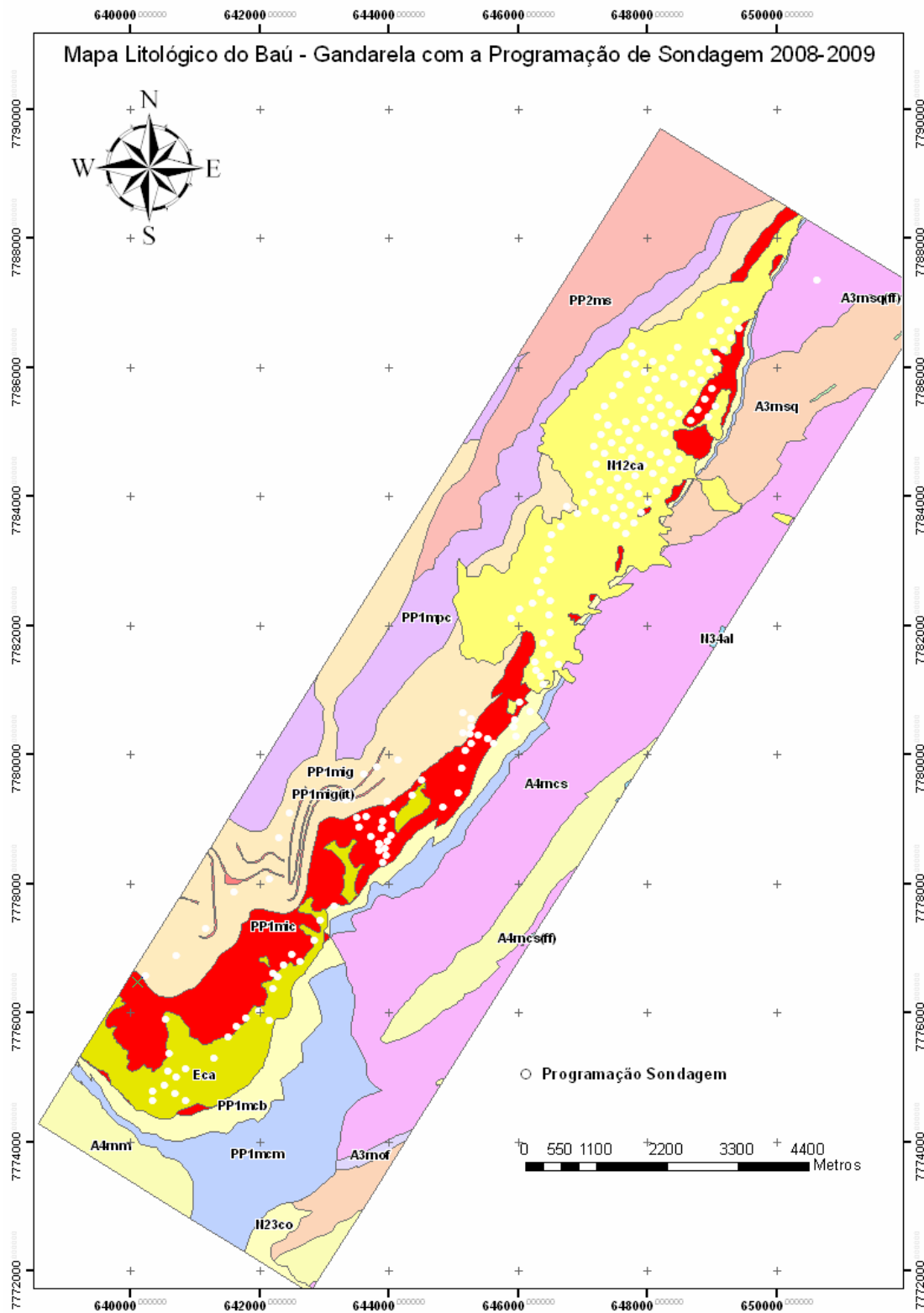


Figura 18 – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela com a programação geológica de sondagem.

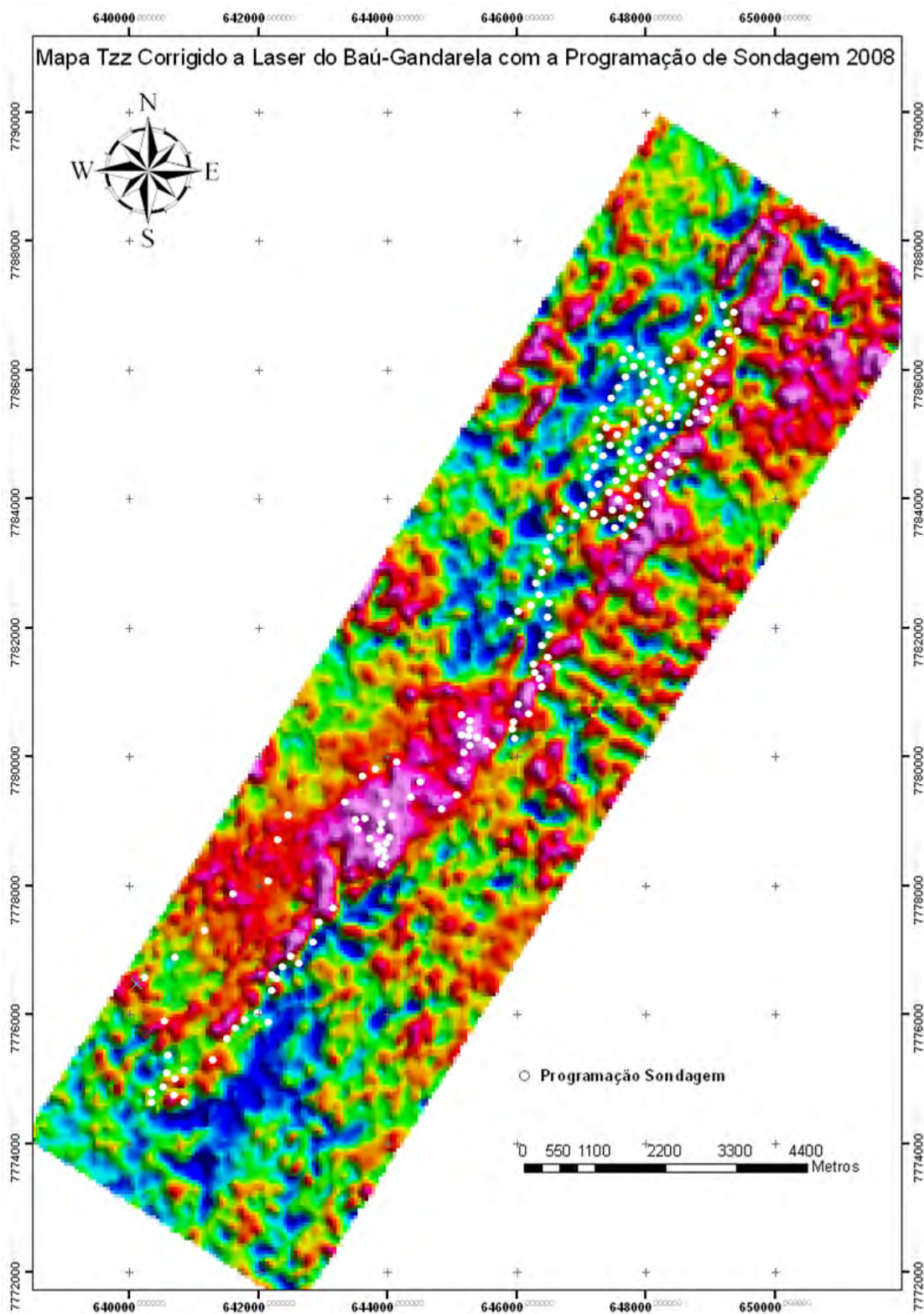


Figura 19 – Mapa da componente T_{zz} da região do Baú-Gandarela com a programação geológica de sondagem.

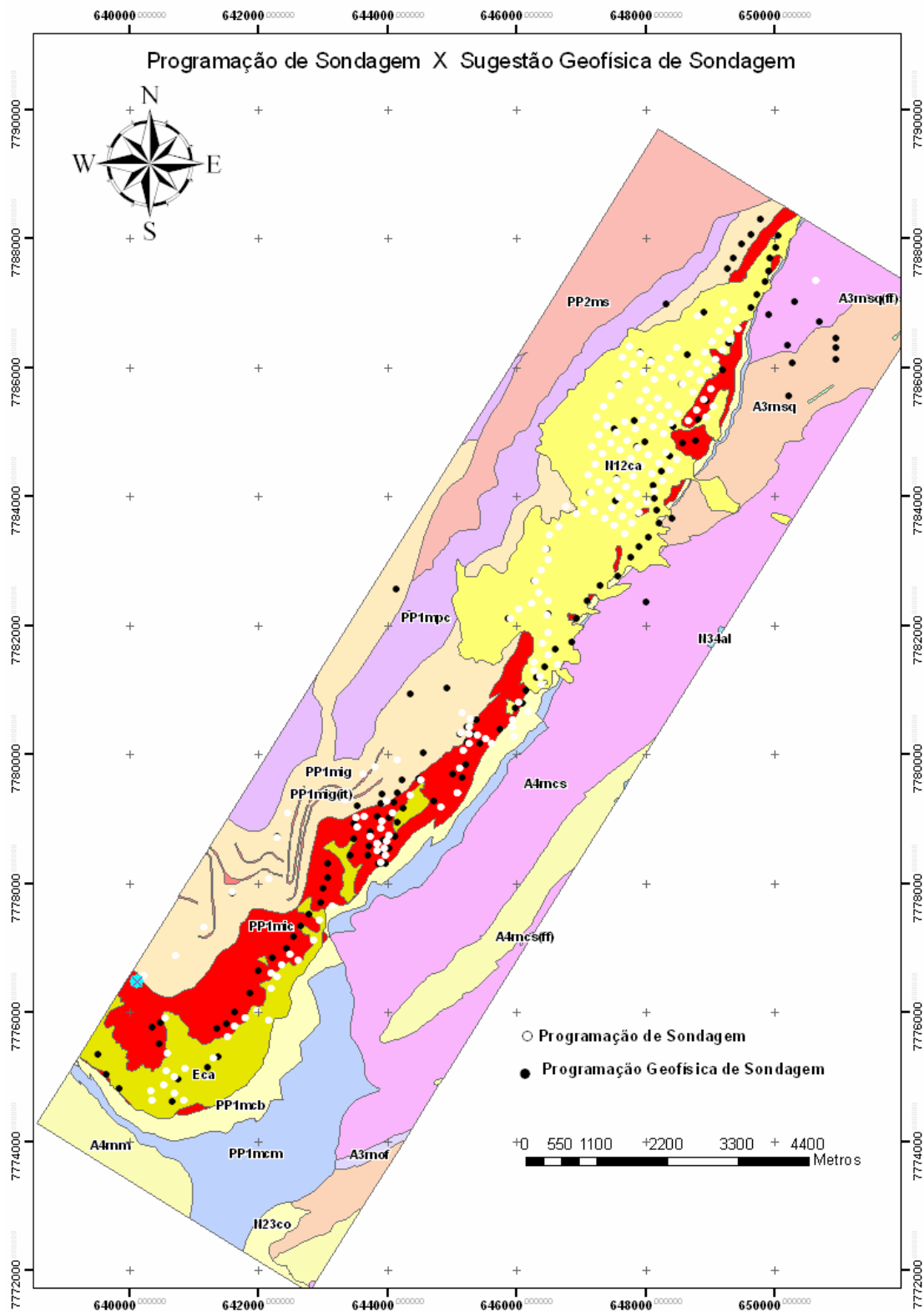


Figura 20 – Mapa litológico da região do Baú-Gandarela com a programação geológica e geofísica de sondagem.

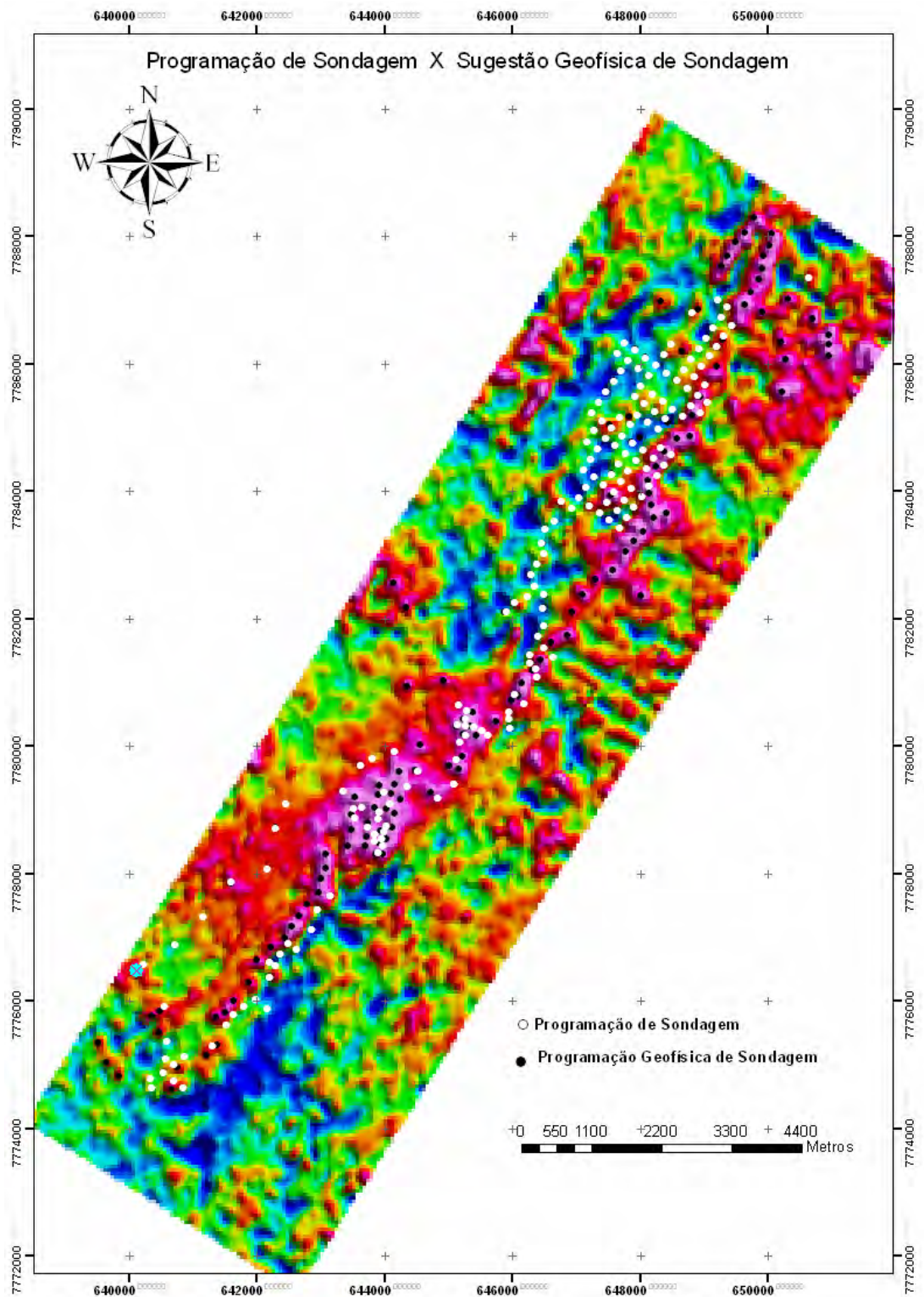


Figura 21 – Mapa da componente T_{zz} corrigida com MDT a laser e densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$ da região do Baú-Gandarela com a programação geológica e geofísica de sondagem.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Marco Antonio Braga. Doutor e Mestre em Geologia com ênfase em Geofísica Aplicada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/Colorado School of Mines em 2009. Especialista em métodos geofísicos aplicados à exploração de minério de ferro. Atualmente é coordenador de geofísica da área de Ferrosos da Vale.

Dionísio Uendro Carlos. Bacharel e Mestre em Geofísica pelo IAG/USP, respectivamente em 2002 e 2006. Especialista em aerogamaespectrometria, tendo desenvolvido os primeiros blocos transportáveis de concreto radioativo para calibração de detectores gama portáteis e aerotransportados da América Latina. Atualmente trabalha na Vale, realizando processamento de dados de 3D-FTG e aeromagnetometria.

Yaoguo Li. Ph.D. em Geofísica pela University of British Columbia, Vancouver, Canadá em 1992. Bacharel em Geofísica pela Wuhan College of Geology, Wuhan, China. Desenvolve há alguns anos a modelagem de dados de gradiometria gravimétrica contribuindo de forma sistemática para o desenvolvimento desta tecnologia.

Misac Nabighian. Ph.D. pelo Lamont Geological Observatory of Columbia University em 1967. Bacharel pelo Instituto de Minas de Bucarest (Romênia) em 1954. Suas contribuições estão tanto na teoria quanto na aplicação da geofísica.