



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

*Luciano Mozer de Assis*

Geração de Modelo Exploratório para o Minério de  
Ferro da Província Mineral de Carajás Através da  
Integração de Dados Multifonte

Dissertação de Mestrado em Geologia

nº 310

Brasília

Abril de 2013



**UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

*Luciano Mozer de Assis*

Geração de Modelo Exploratório para o Minério de  
Ferro da Província Mineral de Carajás Através da  
Integração de Dados Multifonte

Dissertação de Mestrado em Geologia nº 310

Área de Concentração: Geologia Econômica e Prospecção Mineral

**Orientadora:**

Prof. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)

**Banca Examinadora:**

Prof. Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)  
Prof. Dr. Joel Buenano Macambira (UFPA)  
Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (UnB)

Brasília

Abril de 2013



*“Não tenhamos pressa, mas não percamos tempo.”*

*José Saramago*

## Agradecimentos

Agradeço à compreensão, paciência e amor das mulheres da minha vida, minha esposa Ana e minha filha Lara.

Agradeço aos meus pais, Jacinto Lima de Assis e Terezinha R. Mozer de Assis pelo intenso incentivo em desbravar novas fronteiras e constante apoio ao longo da vida.



Agradeço a compreensão e apoio de minha orientadora Adalene Moreira Silva que perseverou em me conduzir à conclusão desta obra.

Agradeço aos companheiros de trabalho na Vale S.A., Dionísio Uendro Carlos, Kessiane Lima Silva, Adele Figueirôa Cabral, Julielson Camelo, Luís Cláudio Gonçalves Costa, Adriana Cássia Zapparoli, Ivan Andrade, Roberto Franklin de Carvalho, Cantidiano de Oliveira Freitas, pela colaboração nos trabalhos e discussões enriquecedoras.

Agradeço aos companheiros que já não labutam mais na Vale S.A., pelas discussões e contestações no início do meu caminho na empresa.

Agradeço aos meus gestores Lucio Cavalli, Henry Francisco Galbiatti e Marco Antonio da Silva Braga pelo incentivo e apoio neste desenvolvimento científico-profissional.

Agradeço à empresa Vale S.A. pelo fomento ao desenvolvimento científico de seu corpo técnico e disponibilização das bases de dados.

Agradeço ao companheiro Pedro Vencovsky Nogueira pela ajuda de última hora.

Agradeço ao ICMBio e à Floresta Nacional de Carajás por permitir o desenvolvimento dos trabalhos nesta unidade de conversação de uso sustentável, dando a oportunidade de mostrar que a mineração e a conservação da natureza são atividades compatíveis.

Agradeço aos desafios que a vida me trouxe me oferecendo uma visão ampla das coisas humanas e desumanas.



## Resumo

Esta dissertação de mestrado apresenta uma proposta de um modelo exploratório integrado para o minério de ferro de uma porção da Província Mineral de Carajás, denominada Serra Norte, localizada no estado do Pará. Para tanto, efetuou-se o processamento, interpretação, integração de dados aerogeofísicos de alta resolução, dados derivados da cartografia geológica na escala 1:20.000, dados estruturais e dados geológicos de cerca de 2.500 furos de sondagem.

A análise dos dados gamaespectrométricos, através da composição colorida RGB KeTheU possibilitou a individualização de assinaturas associadas com as formações ferríferas aflorantes, correlacionadas à Formação Carajás, através dos baixos teores dos radioelementos K,  $eTh$  e  $eU$ . A assinatura do regolito associada com essa unidade mostram platôs enriquecidos em  $eTh$ . No entanto, as coberturas lateríticas associadas às rochas máficas, encaixantes da mineralização associadas às Formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, são enriquecidas  $eTh$  e  $eU$ . Rochas sedimentares clásticas, tais como arenitos e conglomerados de matriz arcoseana e que recobrem o Grupo Grão Pará, mostram altos teores de K.

Os dados aeromagnéticos permitiram a identificação de feições magnéticas e estruturas interessantes sob o ponto de vista prospectivo. Observa-se que os corpos mineralizados com alto teor em Fe não são mapeados ou apresentam baixo gradiente na amplitude do sinal analítico. Através da análise dos produtos derivados dos dados magnéticos, principalmente na amplitude do sinal analítico de ordem zero, foi verificada a correlação entre as formações ferríferas em superfície e subsuperfície com as anomalias observadas, devido à presença de magnetita e martita. A validação efetuada com os dados dos furos de sondagem e modelo de *voxels* gerado a partir dos litotipos interceptados na sondagem confirma essa premissa e indica que a magnetita está mais associada ao protominério e a martita e hematita ao minério de ferro. Localmente, pode-se observar a perda do magnetismo em função da oxidação presente no minério de ferro.

A gradiometria gravimétrica do sistema *Full Tensor Gravity Gradiometry* (3D-FTG) mapeia em detalhe a formação ferrífera da área de estudo tanto em superfície quanto em subsuperfície, em função do contraste de densidade com as encaixantes. A componente em Z, denominada  $T_{zz}$  mapeia com alta precisão os corpos mineralizados enquanto que as componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$  auxiliam no realce do arcabouço estrutural. A interpretação efetuada a partir destes dados foi validada com dados estruturais, dados geológicos coletados em campo e nos testemunhos de sondagem. Como objeto importante deste trabalho foi realizado a comparação entre a metodologia de modelagem tridimensional a partir da inversão dos dados da gravimetria gradiométrica e a modelagem geológica convencional, realizada através da construção de seções transversais e extrusão dos polígonos. Verificou-se que o ajuste qualitativo promovido nos modelos de inversão possui boa aproximação com os modelos geológicos. Como

áreas teste foram selecionados os depósitos de N3, N6 e N8. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, uma vez que a divergência dos valores das massas de recursos minerais obtidos através das duas metodologias de modelagem ficou na ordem de 20%, o que confere confiabilidade no uso do modelo de inversão nas avaliações preliminares de recursos minerais, trazendo direcionamento e melhor utilização dos recursos humanos e financeiros nos programas exploratórios para minério de ferro na região de Carajás.



## Abstract

This Master's thesis proposes an integrated exploration model for iron ore in the Serra Norte portion of Carajás Mineral Province, located in the state of Pará. In order to make this model we processed, interpreted and integrated high resolution airborne geophysical data from 1:20,000 scale geological maps, structural data and geological data from 2,500 drill holes.

The analysis of the products obtained from gamma ray spectrometric data allowed us to individualize signatures associated with outcropping iron formations related to Carajás Formation, considering low levels of K, eU and eTh radioelements. The regolith signature associated to this unit shows eTh enriched plateaus. However, lateritic mantles related to mafic rocks, host rocks of this mineralization associated with Parauapebas and Igarapé Cigarra formations, are eTh and eU enriched. Clastic sedimentary rocks such as arcose sandstones and conglomerates that cover Grão Pará Group showed high levels of K.

By assessing airborne magnetic data it was possible to identify magnetic features and structures that are interesting from the prospective point of view. We can observe that highly mineralized bodies are not mapped or present a low gradient of amplitude in the analytic signal. By analyzing the results of magnetometric data, especially in the amplitude of the magnetic zero-order analytic signal, and due to the presence of magnetite and martite, we could notice the correlation between surface and subsurface iron formations with the anomalies observed. The validation with boreholes and voxel models using lithotypes obtained during drillings confirms this assumption and shows that magnetite is best associated with protore, and martite and hematite with iron ore. Occasionally the loss of magnetism can be observed due to the oxidation seen in iron ore.

The gravimetric gradiometry of the Full Tensor Gravity Gradiometry (3D-FTG) system shows more details on the iron formation design both in the surface and subsurface, due to the density contrast with host rocks. Component Z, called  $T_{zz}$ , maps the mineralized bodies with a high precision, whereas components  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  and  $T_{yz}$  make it possible to highlight the structural framework. The analysis based on these data was validated with structural, geologic data from field and drill holes. An important object of this work was the comparison between the three-dimensional modeling methodology based on the inversion of gradiometric gravimetry data and the conventional geologic modeling, which was done by building cross sections and extrusion of polygons. We observed that the qualitative adjustment done in inversion models is similar to those in the geologic models. N3, N6 and N8 deposits were selected as test areas. The results obtained were successful, since the difference of the amounts of mineral resources volumes obtained with both modeling methods was at about 20%. This confirms the reliability of the use of inversion model in the preliminary evaluations of mineral resources and also brings a safe direction and allows a better use of human and financial resources in iron ore exploration programs in Carajás region.

## Sumário

1	Estrutura da dissertação .....	14
2	Introdução .....	15
3	Localização .....	17
4	Objetivos .....	18
5	Materiais e métodos .....	19
5.1	Materiais .....	19
5.1.1	Gradiometria gravimétrica .....	19
5.1.2	Magnetometria .....	21
5.1.3	Gamaespectrometria .....	22
5.1.4	Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) .....	24
5.1.5	Mapas geológicos .....	24
5.1.6	Amostras de densidades .....	26
5.1.7	Dados de sondagens .....	27
5.2	Métodos .....	29
5.2.1	Recursos computacionais utilizados .....	29
5.2.2	Gradiometria gravimétrica .....	29
5.2.3	Magnetometria .....	40
5.2.4	Gamaespectrometria .....	42
5.2.5	Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) .....	45
4.1.1	Dados de Sondagem .....	47
6	Artigo Científico .....	50
	Uma Abordagem Exploratória para Minério de Ferro em Serra Norte, Carajás .....	50
6.1	Abstract .....	50
6.2	Introdução .....	51
6.3	Contexto geológico e a gênese das formações ferríferas .....	53
6.4	Materiais e métodos .....	61
	Gradiometria gravimétrica .....	61
	Magnetometria .....	64
	Gamaespectrometria .....	65
	Amostras de densidades .....	65
	Dados de sondagem .....	66

6.5	Critérios para a definição de alvos e modelo exploratório integrado .....	68
6.5.1	Gamaespectrometria .....	71
6.5.2	Magnetometria .....	74
6.5.3	Caracterização do minério de ferro através da análise de mapas bidimensionais, inversão e integração tridimensional dos dados derivados do levantamento aerogravimétrico gradiométrico 3D-FTG .....	79
6.5.4	Modelagem tridimensional a partir da inversão dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG e sua aplicação da geofísica na estimativa de recursos para exploração mineral near mine .....	89
6.6	Conclusões.....	96
6.7	Agradecimentos .....	96
6.8	Referências Bibliográficas .....	97
7	Conclusões e Sugestões .....	102
8	Referências Bibliográficas .....	104
	Anexo I Artigo submetido à Economic Geology: An Exploratory Approach for Iron Ore in Serra Norte, Carajás.....	106

## Lista de Figuras

Figura 3-1: Localização da área de trabalho denominada Bloco Norte. A área esta sobreposta sobre imagem Landsat ETM (RGB, bandas 453) que apresenta as porções norte e sul da Serra dos Carajás. ....	17
Figura 5-1: Mapa com a projeção da linhas de voo da aquisição dos dados da gravimetria gradiométrica e magnetometria, sobre modelo digital de elevação obtido a partir dos dados LIDAR, as envoltórias vermelhas mostram as clareiras onde estão alojados os depósitos de minério de ferro. ....	20
Figura 5-2: As imagens evidenciam em: A) Sistema 3D-FTG, mostrando: A) Cápsula; B) IGG's; C) Acelerômetros; D) Componentes do gradiente da gravidade na direção dos três eixos cartesianos (Modificado de Murphy, 2004). ....	21
Figura 5-3: A foto mostra o sensor magnetométrico Scintrex CS-2 instalado na cauda da aeronave. ....	22
Figura 5-4: Mapa com a projeção das linhas de aquisição dos dados de radiometria, mostrando que foi necessário a utilização de dados de dois aerolevantamentos realizados em momentos diferentes, sendo que as linhas pretas são do aerolevantamento realizado em 2004 e as brancas do realizado em 2005. As envoltórias em vermelho indicam as clareiras onde estão alojados os depósitos de minério de ferro e ao fundo está o modelo digital de elevação obtido a partir dos dados LIDAR. ....	23
Figura 5-5: Mapa geológico de Resende e Barbosa (1972), mostrando os litotipos encontrados nas clareiras desta porção de Serra Norte, sobre imagens do sensor orbital Ikonos, de 2007..	25
Figura 5-6: Gráfico das densidades dos litotipos encontrados nos depósitos de minério de ferro de Serra Norte, mostrando através da linha tracejada o limite entre os tipos estéreis e minérios. ....	26
Figura 5-7: Furos de sonda em Serra Norte, mostrando o traço em profundidade, em perspectiva com o modelo digital de elevação. ....	28
Figura 5-8: Grids das componentes do gradiente gravimétrico para a correção de terreno com densidade de 2,67 g/cm <sup>3</sup> , sobre modelo digital de elevação (DEM). Escala em Eotvos (Eo). A) $T_{xx}$ ; B) $T_{xy}$ ; C) $T_{xz}$ ; D) $T_{yy}$ ; E) $T_{yz}$ ; F) $T_{zz}$ . ....	30
Figura 5-9: A) Grid do invariante com as componentes $T_{xy}$ , $T_{xx}$ e $T_{yy}$ , sobre o modelo digital de elevação; B) Grid do invariante com as componentes $T_{xz}$ e $T_{yz}$ ; C) Grid do produto da multiplicação das componentes $T_{xx}$ , $T_{yy}$ e $T_{zz}$ ; D) Composição falsa cor RGB $T_{zz}T_{yy}T_{xx}$ .....	32
Figura 5-10: Resposta de cada componente em relação à geometria do alvo, A) Alvo de direção E-W; B) Alvo de direção N-S; C) Alvo de direção NE-SW; D) Alvo de direção NW-SE. ....	33
Figura 5-11: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N3, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels. ....	36
Figura 5-12: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N6, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels. ....	37
Figura 5-13: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N8, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels. ....	38
Figura 5-14: Soluções de controle de qualidade dos modelos de inversão a partir dos dados 3D-FTG. A) Perfis dos valores observados e calculados da componente do gradiente gravimétrico $T_{zz}$ . Escala em Eotvos (Eo); B) Grid da componente $T_{zz}$ observada; C) Grid da componente $T_{zz}$ calculada. ....	39

Figura 5-15: A) Grid da amplitude do sinal analítico de ordem zero, sobre modelo digital de elevação (DEM); B) A amplitude do gradiente horizontal total do campo magnético anômalo, sobre DEM.....	41
Figura 5-16: Realces aplicados sobre os dados gamaespectrométricos. A) Canal do potássio em percentual; B) Canal do equivalente tório em ppm; C) Canal do equivalente urânio em ppm; D) Razão eTh /K; E) Razão U/K; F) Razão eU/eTh. ....	43
Figura 5-17: Realce aplicados sobre os dados gamaespectrométricos. A) Fator F; B) Composição colorida falsa cor RGB dos canais K, eTh e eU, respectivamente. ....	44
Figura 5-18: Modelo digital de elevação, gerado a partir dos dados LIDAR, onde se pode observar as clareiras delimitadas pelos polígonos em vermelho, onde estão alojados os depósitos de minério de ferro.....	46
Figura 5-19: Modelo de voxels das litologias interceptadas nos furos de sonda em Serra Norte. ....	48
Figura 5-20: Modelo de voxels das formações ferríferas de Serra Norte. ....	49
Figura 6-1: Mapa de localização da área de trabalho em Serra Norte, Província Mineral de Carajás, estado do Pará, Brasil. A área de trabalho está sobreposta à imagem Landsat ETM (RGB 453), mostrando as regiões de Serra Norte e Serra Sul. ....	52
Figura 6-2: A figura ilustra o posicionamento tectônico da Província Mineral de Carajás (PMC) baseado em Tassinari & Macambira (1999) integrado com os dados do Brasil ao milionésimo de Bizzi <i>et al.</i> (2003). ....	54
Figura 6-3: A) Mapa geológico regional modificado de Bizzi <i>et al.</i> (2003) com base em Macambira (2003), Pereira (2009) e interpretações geradas a partir de dados magnetométricos e gamaespectrométricos. B): Legenda e coluna cronolitoestratigráfica de parte do domínio Carajás (Modificada de Macambira, 2003; Bizzi <i>et al.</i> , 2003; Zuchetti, 2007; Pereira, 2009). ....	59
Figura 6-4: Sistema 3D-FTG, mostrando: A) Cápsula; B) IGG's; C) Acelerômetros; D) Componentes do gradiente da gravidade na direção dos três eixos cartesianos (Modificado de Murphy, 2004). ....	62
Figura 6-5: Soluções de controle de qualidade dos modelos de inversão a partir dos dados 3D-FTG. A) Perfis dos valores observados e calculados da componente do gradiente gravimétrico $T_{zz}$ . Escala em Eotvos (Eo); B) Grid da componente $T_{zz}$ observada; C) Grid da componente $T_{zz}$ calculada. ....	63
Figura 6-6: Resposta de cada componente em relação à geometria do alvo, A) Alvo de direção E-W; B) Alvo de direção N-S; C) Alvo de direção NE-SW; D) Alvo de direção NW-SE. ....	64
Figura 6-7: Furos de sonda em Serra Norte, mostrando o traço em profundidade, em perspectiva com o modelo digital de elevação. ....	66
Figura 6-8: Modelo de voxels das litologias interceptadas nos furos de sonda em Serra Norte. ....	67
Figura 6-9: Modelo de voxels das formações ferríferas de Serra Norte. ....	67
Figura 6-10: A) Composição colorida RGB dos radioelementos K, eTh e eU, mostrando em: a) Conglomerados da Formação Gorotire; b) Arenitos da Formação Águas Claras; c) Coberturas lateríticas estéreis sobre rochas máficas; d) Afloramentos de formações ferríferas e lateritas mineralizadas e) Granito Serra dos Carajás; f) Rochas Máficas da Formação Igarapé Cigarra; g) Rochas máficas da Formação Parauapebas; B) Os polígonos em branco mostram os	

afloramentos de formações ferríferas mapeados por Resende e Barbosa (1972) sobre o  
 composição colorida RGB (KThU)..... 73

Figura 6-11: Amplitude do sinal analítico, com contraste linear de cores sobre o modelo de  
 voxels (a) das formações ferríferas caracterizadas em testemunhos de sondagem. .... 76

Figura 6-12: Amplitude do sinal analítico de ordem zero, mostrando em (a) ocorrências de  
 hematititos friáveis deslocados em relação aos altos gradientes magnetométricos. .... 77

Figura 6-13: A) Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem zero B) Imagem da  
 componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ . .... 78

Figura 6-14: Dados de densidade para Serra Norte coletados em testemunhos de sondagem e  
 frentes de lavra, mostrando o contraste entre as formações ferríferas e suas encaixantes. .... 79

Figura 6-15: Grid da componente  $T_{zz}$ , com contraste de cor linear, sobreposto ao modelo de  
 voxels das interseções de formações ferríferas, mostrando em (a) a correlação com os altos  
 gradientes..... 80

Figura 6-16: A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N3,  
 mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a  
 partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e  
 protominério); C) Localização da seção vertical em N3, sobre o grid do  $T_{zz}$ ..... 81

Figura 6-17: A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N6,  
 mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a  
 partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e  
 protominério); C) Localização da seção vertical em N6, sobre o grid do  $T_{zz}$ ..... 82

Figura 6-18: A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N8,  
 mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a  
 partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e  
 protominério); C) Localização da seção vertical em N8, sobre o grid do  $T_{zz}$ ..... 83

Figura 6-19: Grid do invariante  $Invar\ T_{xz}T_{yz}$  mostrando em (a) os baixos gradientes  
 correlacionados com a cobertura laterítica mineralizada (CM)..... 84

Figura 6-20: Mapa geológico com mesoestruturas interpretadas por Resende e Barbosa (1972)  
 em vermelho e na porção N por Macambira (2003) em amarelo. Fundo formado por imagens  
 Ikonos de 2007. .... 86

Figura 6-21: Interpretação estrutural a partir das componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$ . A)  
 Interpretação estrutural sobre o grid da componente  $T_{yz}$ , realçando estruturas E-W; B)  
 Interpretação estrutural sobre o grid da componente  $T_{xz}$ , realçando estruturas N-S..... 87

Figura 6-22: Diagramas de frequência das foliações e clivagens espaçadas nos corpos N3, N4,  
 N5 e N8 obtidas em campo que corroboram as interpretações estruturais. .... 88

Figura 6-23: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N3. A) Modelo  
 tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de  
 minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro. .... 91

Figura 6-24: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N6. A) Modelo  
 tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de  
 minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro. .... 92

Figura 6-25: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N8. A) Modelo  
 tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de  
 minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro. .... 93



Figura 6-26: Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N3, mostrando a projeção dos furos de sonda.....	94
Figura 6-27: Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N6, mostrando a projeção dos furos de sonda.....	94
Figura 6-28: Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N8, mostrando a projeção dos furos de sonda.....	95

## Lista de Tabelas

Tabela 4-1: Dados de densidade para os diferentes litotipos encontrados nos depósitos de minério de ferro de Serra Norte.....	24
Tabela 6-1: Litotipos mais comuns em Serra Norte e suas principais características.....	51
Tabela 6-2: Tabela comparativa entre as metodologias de estimativa de recursos potenciais.....	70

## 1 Estrutura da dissertação

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido na Universidade de Brasília sob a orientação da Professora Dra. Adalene Moreira Silva e em cooperação com a empresa Vale S.A.

Essa dissertação de mestrado está estruturada em quatro partes, sendo a primeira constituída do corpo principal do projeto, onde é apresentada a introdução ao problema estudado, os objetivos da dissertação, os materiais e métodos utilizados. A segunda parte está organizada em formato de artigo, em língua portuguesa, a ser submetido à *Economic Geology*, periódico do tipo A1 e intitula-se “Uma Abordagem Exploratória para Minério de Ferro em Serra Norte, Carajás”. Na terceira parte encontram-se as discussões e considerações objetivando sumarizar os resultados obtidos, bem como, a aplicação em outras regiões. A quarta parte é constituída do anexo com o artigo “An Exploratory Approach for Iron Ore in Serra Norte, Carajás”, em língua inglesa, que foi submetido ao periódico *Economic Geology*.

## 2 Introdução

A Província Mineral de Carajás (PMC) é mundialmente conhecida por hospedar mineralizações e depósitos de classe mundial de minério de ferro, manganês, Cu-Au tipo *Iron Oxide Copper Gold* (IOCG), ouro e elementos do grupo da Platina (EGP) que em grande parte são explorados desde os meados dos anos 80, quando foi aberta a primeira mina de minério de ferro de Carajás conhecida como N4E em 1985.

Os trabalhos de exploração mineral na região tiveram seu início em 1954 através do projeto Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia – DNPM/Prospec, onde as clareiras foram interpretadas como um conjunto de um relevo cárstico em função da existência de lagoas doliniformes e pela ausência de trabalhos de campo. O primeiro reconhecimento geológico da região, em 1966, teve como foco principal a busca por depósitos de minério de manganês.

A descoberta de formações ferríferas ocorreu em 31 de julho de 1967, através do pouso na clareira com canga hematítica na serra Arqueada, indicando um grande potencial para prospecção de minério de ferro. Em agosto de 1967 foi realizado o primeiro levantamento aeromagnético na região, e os produtos derivados mostraram indicações de alvos que foram checados no mesmo mês. Os resultados possibilitaram as descobertas das ocorrências de minério de ferro em Serra Norte, nas clareiras N1, N4, N5e S11.

Com a conclusão dos trabalhos de pesquisa em 1972 foram bloqueados recursos de minério de ferro em toda PMC da ordem de 17,3 Gt@ 66% Fe (Resende e Barbosa, 1972). Atualmente (dados de 31 de dezembro de 2011), após 26 anos de atividade mineral, na exploração de minério de ferro, em Serra Norte, os recursos auditados (medido, indicado e inferido) de minério de ferro na PMC somam cerca de 11,28 Gt@ 65,9 % Fe e baixos teores de contaminantes (Si, Al, Mn e P), dos quais 7,38 Gt@ 66,7% Fe constituem as reservas provadas e prováveis (Valadão *et al.*, 2012). A produção anual de minério de ferro em Carajás está na ordem de 110 milhões de toneladas.

Com a crescente demanda de minério de ferro que o mundo vem experimentando no século 21, os preços desta commodity também têm seguido sua escalada, absorvendo quedas momentâneas em decorrência do estabelecimento da crise financeira nos países desenvolvidos e irregularidades na taxa de crescimento dos países em desenvolvimento. Dentro deste cenário, a expectativa de demanda para o minério de ferro é crescente, justificando a manutenção dos programas exploratórios.

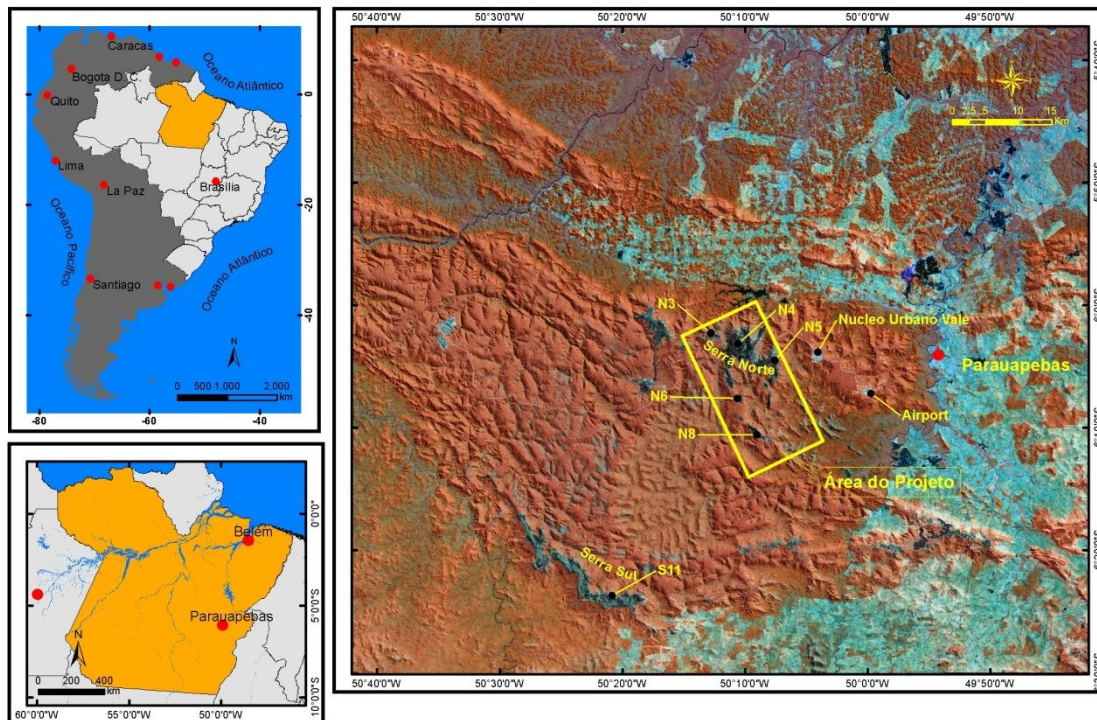
A principal meta dentro desse trabalho de pesquisa é apresentar uma abordagem exploratória para o minério de ferro, de caráter regional a semi-detalhe, com base em métodos indiretos validados por dados de campo, ensaios de densidade e dados de sondagem. Para tanto, foi utilizado o estado da arte do realce e processamento de dados geofísicos obtidos a partir de aerolevanteamento magnetométrico, gamaespectrométrico e gravimétrico gradiométrico.

A área escolhida para o desenvolvimento deste trabalho pertence ao contexto de um conjunto de 5 depósitos conhecidos de minério de ferro, denominados N3, N4, N5, N6 e N8, sendo que estão em exploração os depósitos de N4 e N5. Os demais depósitos ainda preservados possuem base de dados robusta, em função da conclusão de trabalhos recentes de reavaliação de recursos. Estes dados foram disponibilizados para que fossem utilizados no processo de validação das interpretações, trazendo maior confiança a esse estudo.

### 3 Localização

A área deste trabalho de pesquisa encontra-se em uma porção de Serra Norte, dentro dos limites da Floresta Nacional de Carajás, município de Parauapebas, estado do Pará (Figura 3-1), possuindo cerca de 276Km<sup>2</sup> de área.

O acesso à área pode ser feito por via terrestre através de rodovias asfaltadas que ligam o local deste estudo às cidades de Parauapebas e conseqüentemente à malha rodoviária brasileira ou por via aérea, por meio do aeroporto de Carajás.



**Figura 3-1: Localização da área de trabalho denominada Bloco Norte. A área esta sobreposta sobre imagem Landsat ETM (RGB, bandas 453) que apresenta as porções norte e sul da Serra dos Carajás.**

## 4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a proposição de um modelo exploratório para o minério de ferro com base em dados de aerolevantamentos geofísicos utilizando os métodos gamaespectrométrico, magnetométrico e gravimétrico gradiométrico, através da interpretação dos produtos derivados dos dados aerogeofísicos, devidamente validados através de vínculos com as bases de dados dos trabalhos de campo.

Como objetivos específicos, propõem-se:

- ✓ Compreender o comportamento dos radioelementos (K, eU e eTh) com base nos dados de gamaespectrometria, analisando sua distribuição;
- ✓ cartografar estruturas regionais e locais com o intuito de definir zonas de influência metalogenética através da investigação qualitativa de dados aeromagnetométricos;
- ✓ Compreender o significado geológico das componentes do gradiente gravimétrico, com base nos dados da gravimetria gradiométrica, analisando os contrastes de densidade do substrato rochoso;
- ✓ Comparar a metodologia de modelagem tridimensional a partir da inversão dos dados da gradiometria gravimétrica com a metodologia de modelagem geológica através de seções transversais e extrusão;

## 5 Materiais e métodos

Para a realização deste trabalho foram utilizadas bases de dados dos levantamentos aerogeofísicos *Full Tensor Gravity Gradiometry* (3D-FTG), magnetométrico e gamaespectrométrico. Como base de dados auxiliar foram utilizados mapas geológicos, dados de densidade de amostras selecionadas, dados das diversas campanhas de sondagem rotativa diamantada, bem como, os dados do aerolevanteamento *Laser Imaging Detection and Ranging* (LIDAR) que compuseram o modelo digital de elevação (DEM).

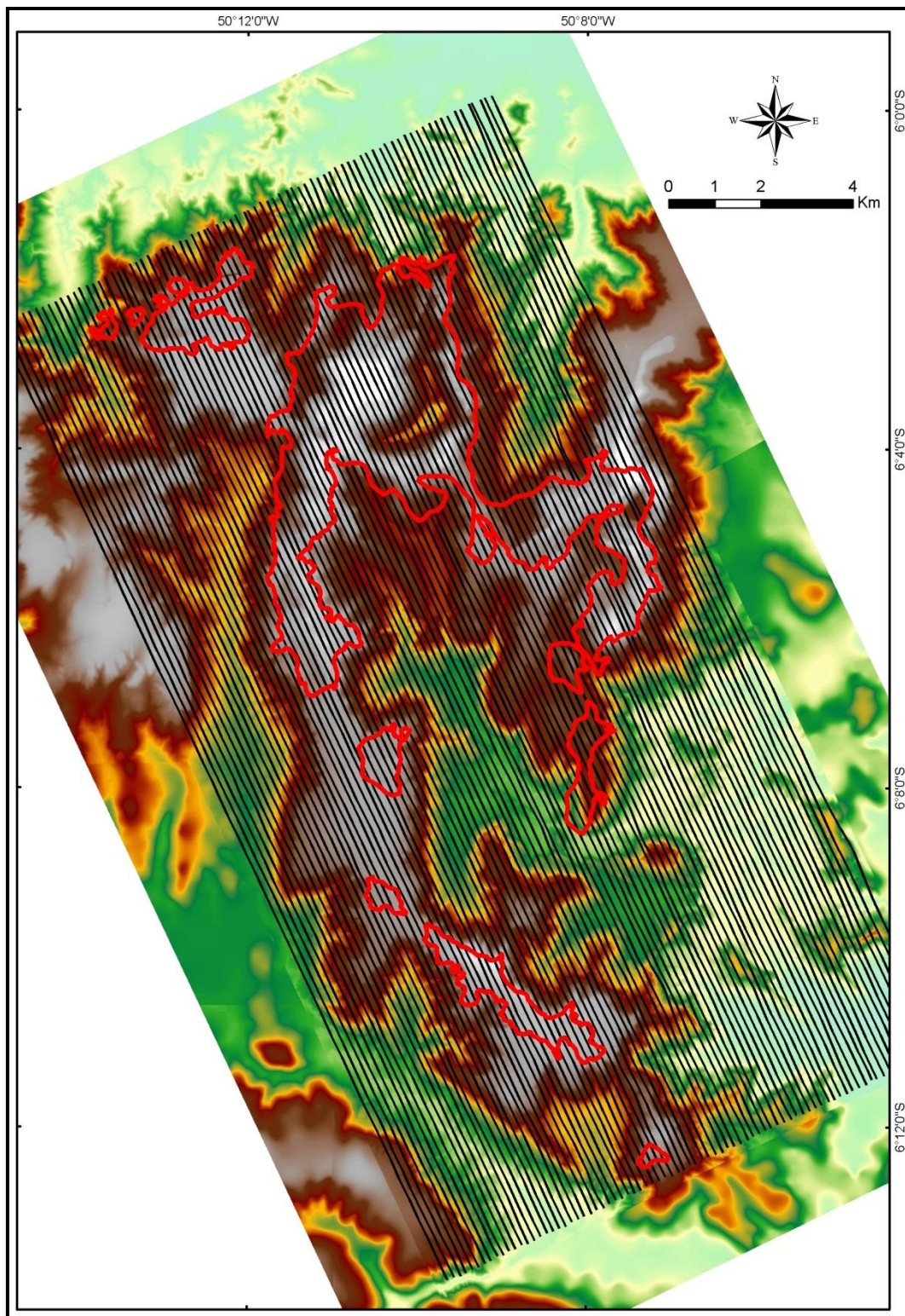
### 5.1 Materiais

#### 5.1.1 Gradiometria gravimétrica

O aerolevanteamento 3D-FTG recobriu uma área de 276Km<sup>2</sup> (12Km x23Km), através da execução de 79 linhas de voo (Figura 5-1), cobrindo as áreas com coberturas lateríticas e vegetação rupestres das clareiras de nomes N3, N4, N5, N6, N7, N8 e N9. O aerolevanteamento foi realizado segundo a direção N25W, com altura de voo de 150m em relação ao terreno e espaçamento entre linhas de 150m.

A direção das linhas de voo foi definida para que tentativamente, ficassem alinhadas com as principais feições fisiográficas de Serra Norte, garantindo menor interferência do relevo na aquisição dos dados, conforme sugerido por Braga et al. (2009).

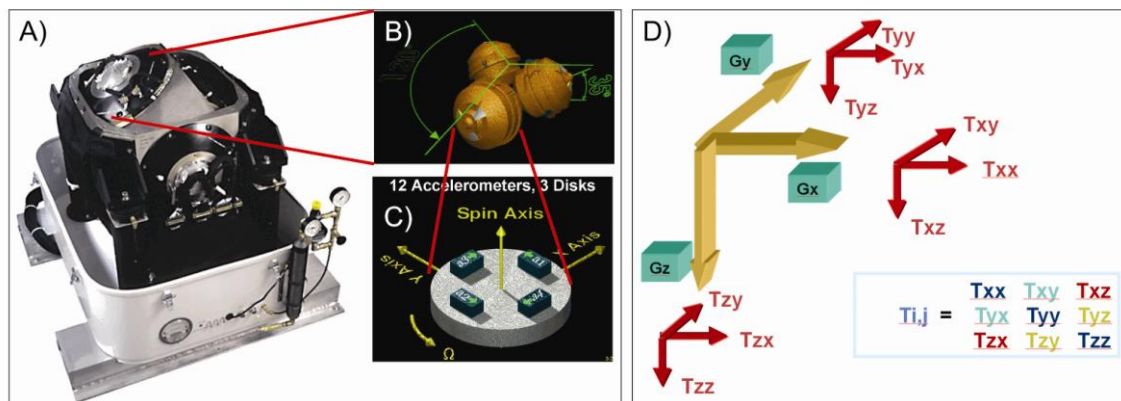




**Figura 5-1:** Mapa com a projeção da linhas de voo da aquisição dos dados da gravimetria gradiométrica e magnetometria, sobre modelo digital de elevação obtido a partir dos dados LIDAR, as envoltórias vermelhas mostram as clareiras onde estão alojados os depósitos de minério de ferro.

O sistema 3D-FTG (Figura 6-4) é uma plataforma móvel, inserida numa cápsula aeronáutica e é composto por 12 acelerômetros, dispostos igualmente em 3

instrumentos de gradiente da gravidade (IGG) que medem as 5 componentes independentes do gradiente da gravidade,  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$ ,  $T_{zz}$ ,  $T_{xx}$  ou  $T_{yy}$  e, representando a taxa de variação das componentes  $G_x$ ,  $G_y$  e  $G_z$ , que por sua vez, representam a aceleração da gravidade ao longo dos eixos cartesianos (Murphy, 2004; Galbiatti *et al.*, 2011).



**Figura 5-2:** As imagens evidenciam em: A) Sistema 3D-FTG, mostrando: A) Cápsula; B) IGG's; C) Acelerômetros; D) Componentes do gradiente da gravidade na direção dos três eixos cartesianos (Modificado de Murphy, 2004).

O sistema 3D-FTG é um instrumento altamente sensível que requer um ambiente livre de ruídos e ao mesmo tempo estável, para obter o máximo de eficiência. Como essas duas condições não podem ser evitadas em sua totalidade, as vibrações e acelerações que contribuem de forma espúria devem ser administradas. Além disso, o sistema FTG deve ser instalado próximo ao centro de gravidade da aeronave para reduzir os ruídos. O sistema foi montado numa aeronave do tipo Cessna Grand Caravan.

### 5.1.2 Magnetometria

O aerolevanteamento magnetométrico foi realizado simultaneamente com o aerolevanteamento 3D-FTG, possuindo então as mesmas características do espaçamento entre linhas e altura do voo (Figura 5-3), sendo que não foram executadas linhas de controle.

O sistema aeromagnetométrico utilizado no levantamento de Serra Norte foi constituído por um sensor de bombeamento ótico de vapor de césio, modelo Scintrex CS-2, com



sensibilidade de 0,001nT. A taxa de amostragem foi de 10Hz, gerando 1 medida a cada 7m, com leitura dos valores do campo magnético bruto e compensado.

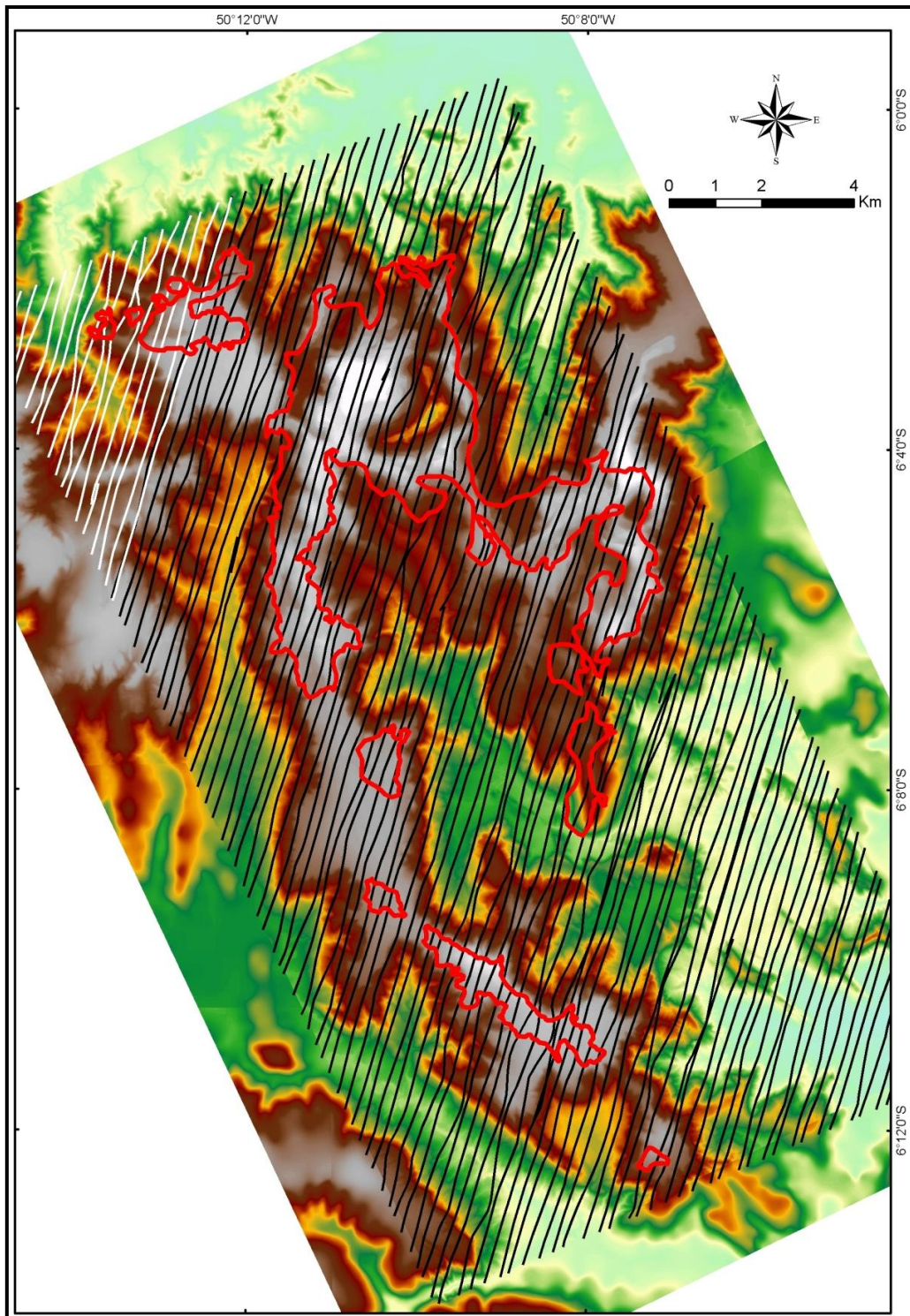
O sensor foi montado no prolongamento da cauda da aeronave. O sinal do sensor é recebido através de pré-amplificadores, localizados na base do cone de cauda e enviado ao sistema de aquisição aeromagnética FASDAS (Lasa,2010).



**Figura 5-3:** A foto mostra o sensor magnetométrico Scintrex CS-2 instalado na cauda da aeronave.

### 5.1.3 Gamaespectrometria

O aerolevantamento gamaespectrométrico foi realizado durante os anos de 2004 e 2005, segundo a direção N15E, com altura de voo de 150m em relação ao terreno e espaçamento entre as linhas de 250m e com linhas de controle segundo a direção N75W. Para a cobertura total da área foi necessário utilizar dados de dois aerolevantamentos, com mesmas características de aquisição, utilizando-se de segmentos de 113 linhas para cobrir o polígono deste trabalho. A Figura 5-4 mostra a localização das linhas e áreas de vegetação aberta que foram cobertas nos aerolevantamentos.



**Figura 5-4:** Mapa com a projeção das linhas de aquisição dos dados de radiometria, mostrando que foi necessário a utilização de dados de dois aerolevantamentos realizados em momentos diferentes, sendo que as linhas pretas são do aerolevantamento realizado em 2004 e as brancas do realizado em 2005. As envoltórias em vermelho indicam as clareiras onde estão alojados os depósitos de minério de ferro e ao fundo está o modelo digital de elevação obtido a partir dos dados LIDAR

Foi utilizada uma aeronave Cessna – Grand Caravan equipada com gamaespectrômetro da EXPLORANIUM, modelo GR-820, de 256 canais espectrais, constituído de 5 cristais de iodeto de sódio (NaI) com volume total de 21 litros e sistema de navegação DGPS, com receptor Trimble AgGPS 132, de 12 canais. O intervalo entre as medições foi de 1Hz, ou seja, uma medida a cada 70m.

#### **5.1.4 Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR)**

Os dados LIDAR fazem parte de um conjunto que cobriu toda a região de Serra Norte e foram obtidos através da utilização de uma aeronave EMB-810, Seneca III, portando o equipamento LASER Aerotransportado - ALTM 2025, com erro linear na planimetria de 0,5m e 1,0m na altimetria. Os dados são obtidos através da irradiação de feixes de *LASER*, gerando uma nuvem de pontos que passam por processo de filtragem para eliminar os pontos relacionados às superfícies, tais como a cobertura vegetal e edificações, e assim obter os dados para a confecção do modelo digital de elevação (DEM).

#### **5.1.5 Mapas geológicos**

Como suporte para validação das interpretações e observações foi utilizado o mapa geológico produzido no relatório final de pesquisa, por Resende e Barbosa (1972), focado nos altos dos platôs onde ocorrem as formações ferríferas (Figura 5-5). Como suporte adicional, foi utilizado o mapa geológico do trabalho de doutoramento de Macambira (2003) que teve foco nas formações ferríferas e suas encaixantes.



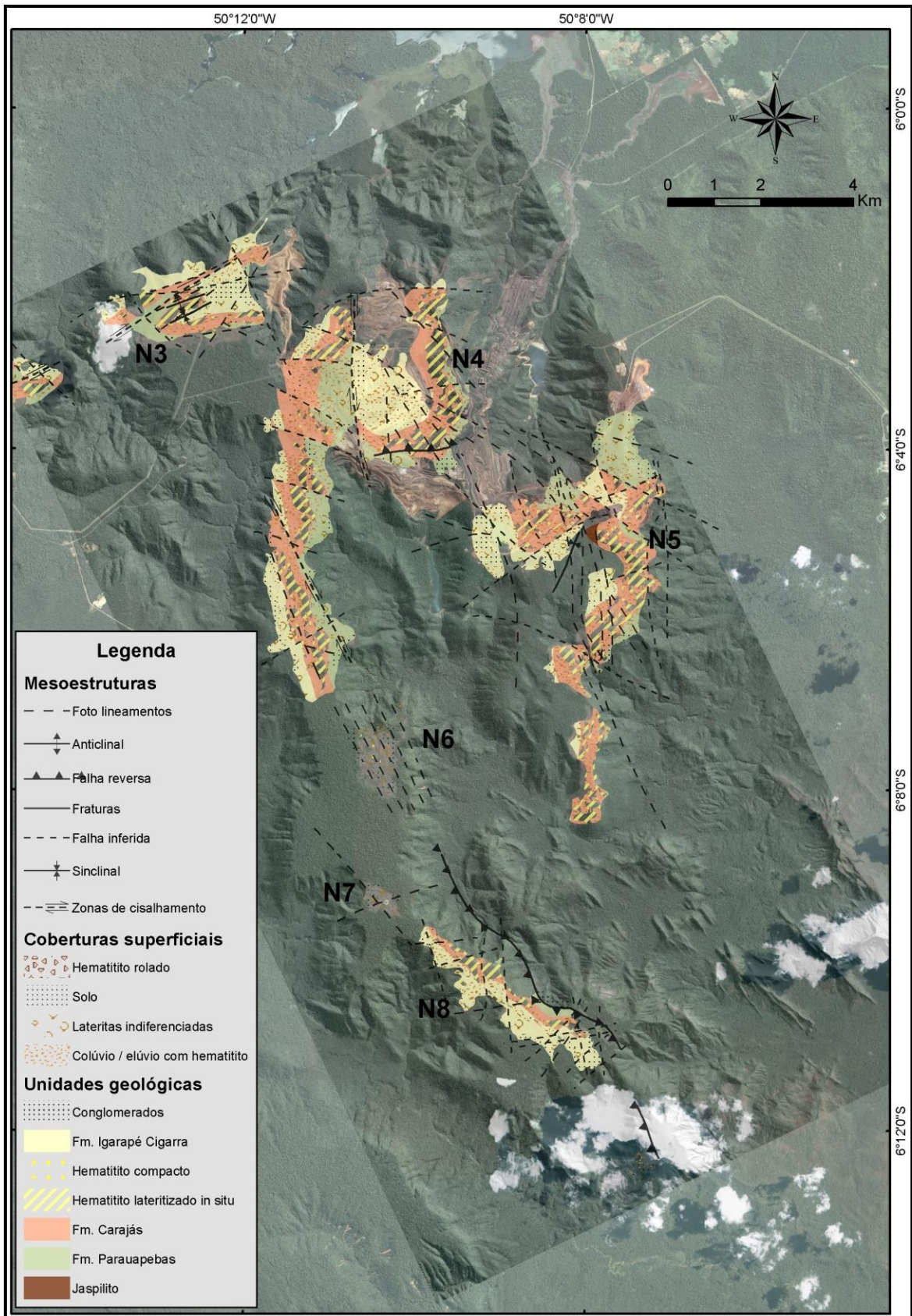


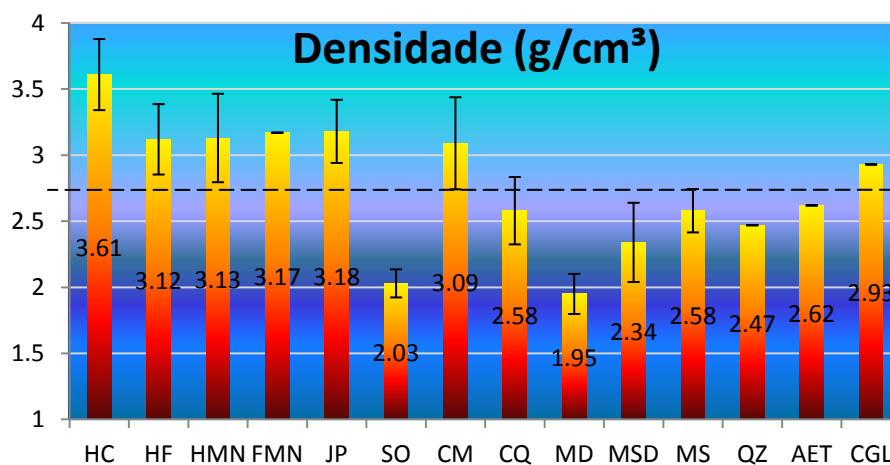
Figura 5-5: Mapa geológico de Resende e Barbosa (1972), mostrando os litotipos encontrados nas clareiras desta porção de Serra Norte, sobre imagens do sensor orbital Ikonos, de 2007.

### 5.1.6 Amostras de densidades

Como referências das densidades dos litotipos foram usadas as amostras que foram coletadas ao longo dos anos que dão suporte às estimativas de recursos minerais dos projetos de minério de ferro em Serra Norte. Ao todo foram utilizados dados de 973 medidas de densidade (Tabela 5-1e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

**Tabela 5-1: Dados de densidade para os diferentes litotipos encontrados nos depósitos de minério de ferro de Serra Norte.**

Sigla	Litotipo	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	# medidas
HC	Hematitito compacto	3,61	0,27	136
HF	Hematitito friável	3,12	0,27	211
HMN	Hematitito manganésífero	3,13	0,33	61
FMN	Formação ferrífera manganésifera	3,17		2
JP	Jaspilito	3,18	0,24	85
SO	Solo	2,03	0,11	9
CM	Colúvio / elúvio de hematitito lateritizado	3,09	0,35	51
CQ	Lateritas	2,58	0,25	25
MD	Saprolito das rochas máficas, horizonte A/B	1,95	0,15	217
MSD	Saprolito das rochas máficas, horizonte C/R	2,34	0,30	32
MS	Rochas máficas indiferenciadas	2,58	0,16	139
QZ	Veio de Quartzo	2,47		1
AET	Arenito	2,62		2
CGL	Conglomerado	2,93		2



**Figura 5-6: Gráfico das densidades dos litotipos encontrados nos depósitos de minério de ferro de Serra Norte, mostrando através da linha tracejada o limite entre os tipos estéreis e minérios.**

### 5.1.7 Dados de sondagens

A região de Serra Norte possui campanhas de sondagem que datam desde os anos 60, quando iniciaram os trabalhos de exploração mineral em Carajás. A base de dados conta com 2526 furos de sondagem rotativa diamantada (Figura 6-7), com os dados de localização (XYZ) no arquivo *Collar*, de desvio do furo no arquivo *Survey* e caracterização litológica visual e interpretada com os resultados de análises químicas no arquivo *Assay*.



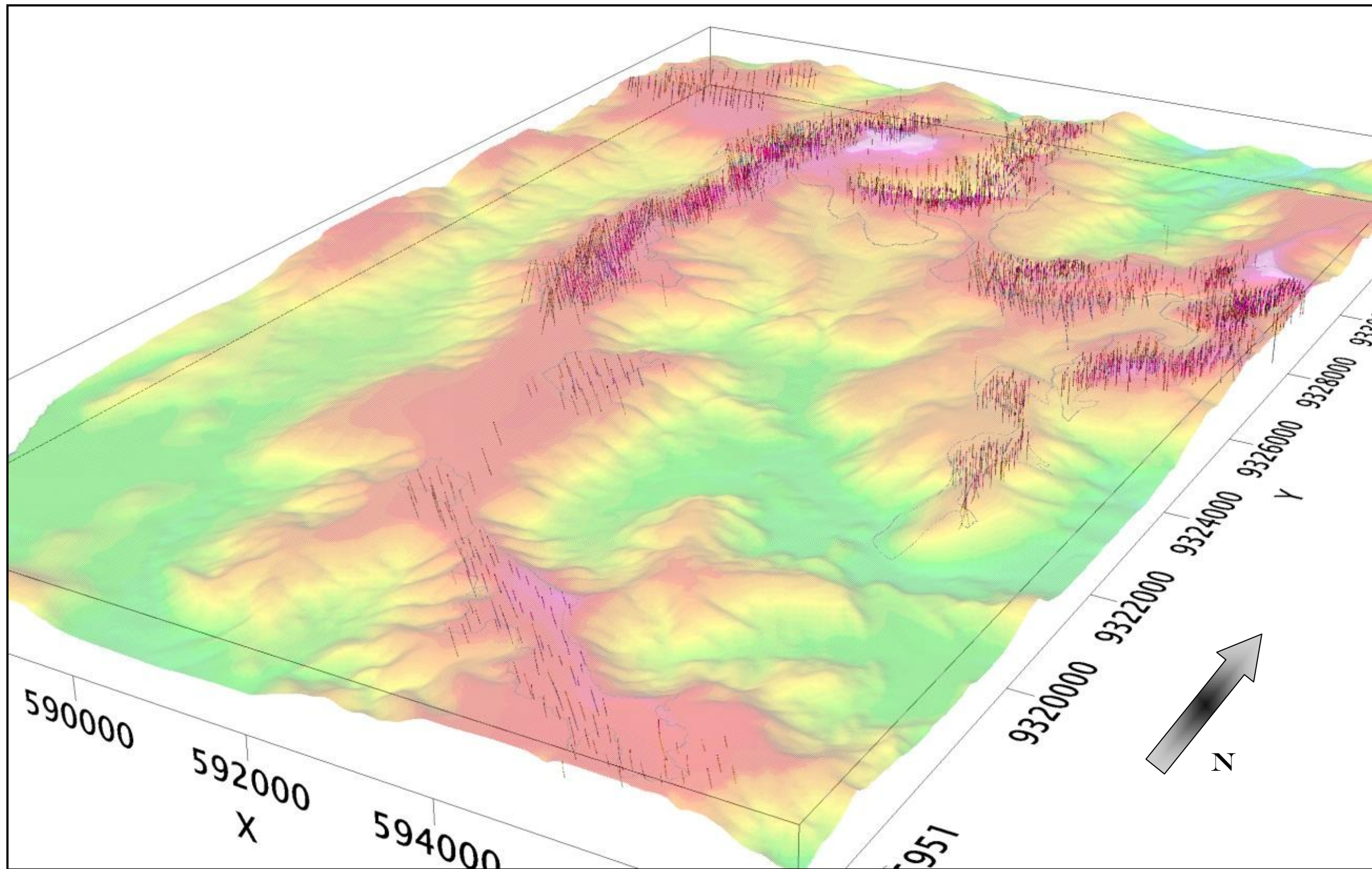


Figura 5-7: Furos de sonda em Serra Norte, mostrando o traço em profundidade, em perspectiva com o modelo digital de elevação.

## 5.2 Métodos

Para a realização deste trabalho foi utilizado o estado da arte das técnicas de realce e processamento de dados de aerolevantamentos magnéticos, gamaespectrométricos e gradiométrico gravimétricos.

### 5.2.1 Recursos computacionais utilizados

Para o processamento dos diversos dados utilizados neste trabalho de pesquisa, foram utilizados *softwares* em ambiente de sistema de informações georeferenciadas (SIG), tais como o Oasis Montaj (versão 7.1), ArcMap (versão 10.1), Target for ArcGis (versão 3.5.1). Na rotina de inversão de dados de gradiometria gravimétrica foi utilizado software desenvolvido pela Colorado School of Mines, GG3D.

### 5.2.2 Gradiometria gravimétrica

Os dados adquiridos no aerolevanteamento 3D-FTG passaram pelo processo de nivelamento, redução do ruído de todos os tensores e correção topográfica. A correção topográfica é importante para reduzir o efeito das feições fisiográficas no sinal oriundo das feições geológicas. A empresa executora do aerolevanteamento e a Vale S.A. possuem metodologia proprietária de correção do relevo, utilizando-se da modelagem com grids e prismas 3-D (Mataragio *et al.*, 2011).

Para a área deste aerolevanteamento a densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$  foi a que apresentou o melhor resultado na eliminação do efeito da fisiografia nos dados *free air* medidos. Desta forma, foram geradas as superfícies contínuas, através da interpolação por mínima curvatura, de todas as componentes do gradiente gravimétrico (Figura 5-8) para que fosse realizada a avaliação e a interpretação.



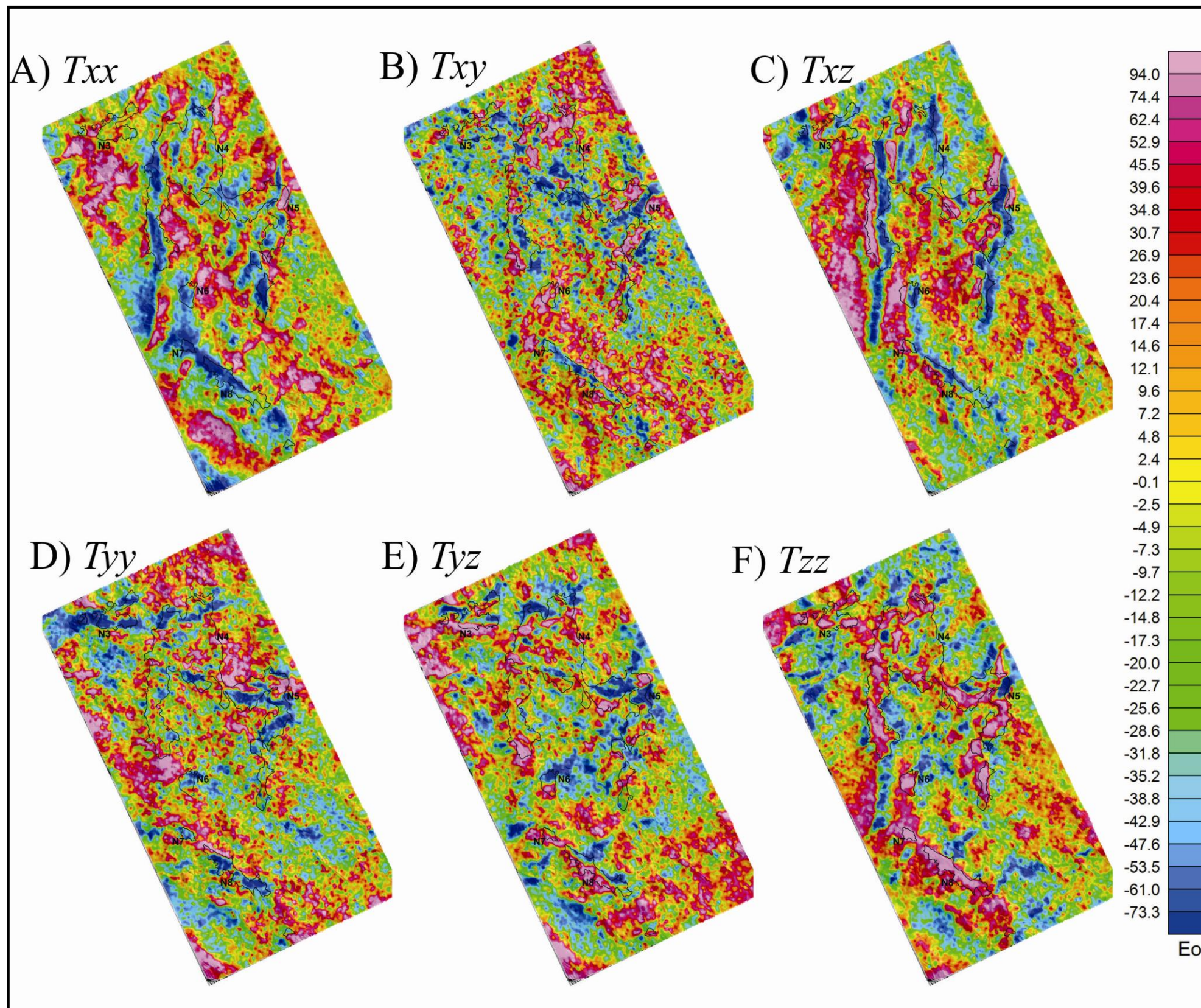


Figura 5-8: Grids das componentes do gradiente gravimétrico para a correção de terreno com densidade de 2,67 g/cm<sup>3</sup>, sobre modelo digital de elevação (DEM). Escala em Eotvos (Eo). A)  $T_{xx}$ ; B)  $T_{xy}$ ; C)  $T_{xz}$ ; D)  $T_{yy}$ ; E)  $T_{yz}$ ; F)  $T_{zz}$ .

Adicionalmente aos grids das componentes do gradiente da gravidade, foram gerados outros produtos (Figura 5-9), seguindo a técnica sugerida por Pedersen & Rasmussen (1990), modificada por Murphy (2007), onde são consideradas somente as componentes horizontais, que segundo este autor promove maior confiança ao mapeamento geológico. Com a aplicação desta técnica foram gerados os invariantes  $Invar_{TxzTyz}$  e  $Invar_{TxyTxxTyy}$ . Os invariantes são dados pelas seguintes equações:

$$Invar_{TxzTyz} = \sqrt{(Txz^2 + Tyz^2)} \quad \text{Equação 1}$$

$$Invar_{TxyTxxTyy} = \sqrt{(Txy^2 + ((Tyy - Txx)/2)^2)} \quad \text{Equação 2}$$

Carlos (*in prep.*) sugere que o grid gerado a partir da multiplicação das componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{zz}$  possui maior capacidade de discriminação das anomalias de maior frequência, o que foi aplicado também para comparação com os demais resultados. Como último produto a partir dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG, foi gerada uma composição falsa cor RGB com as componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{zz}$  e  $T_{yy}$ .

Murphy (2004) a partir de observações e do modelo teórico representando a resposta de cada componente do gradiente da gravidade para um alvo ideal, mostrando que a componente  $T_{zz}$  realça o corpo anômalo, enquanto que as demais componentes realçam as bordas do corpo anômalo, sendo que as componentes  $T_{xx}$  e  $T_{xz}$  realçam as bordas na direção N-S e as componentes  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$  realçam as bordas E-W. Através deste realce de bordas os lineamentos estruturais podem ser realçados, indicando ser uma ferramenta útil para a análise estrutural. A magnitude das componentes  $T_{xx}$  e  $T_{yy}$  também pode ser utilizada para investigar a espessura dos alvos. Com estas considerações, foi analisado o realce de borda de cada componente do gradiente gravimétrico em relação a corpos de direção N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Figura 6-6) e assim poder traçar os lineamentos estruturais com maior confiança em relação ao seu posicionamento.



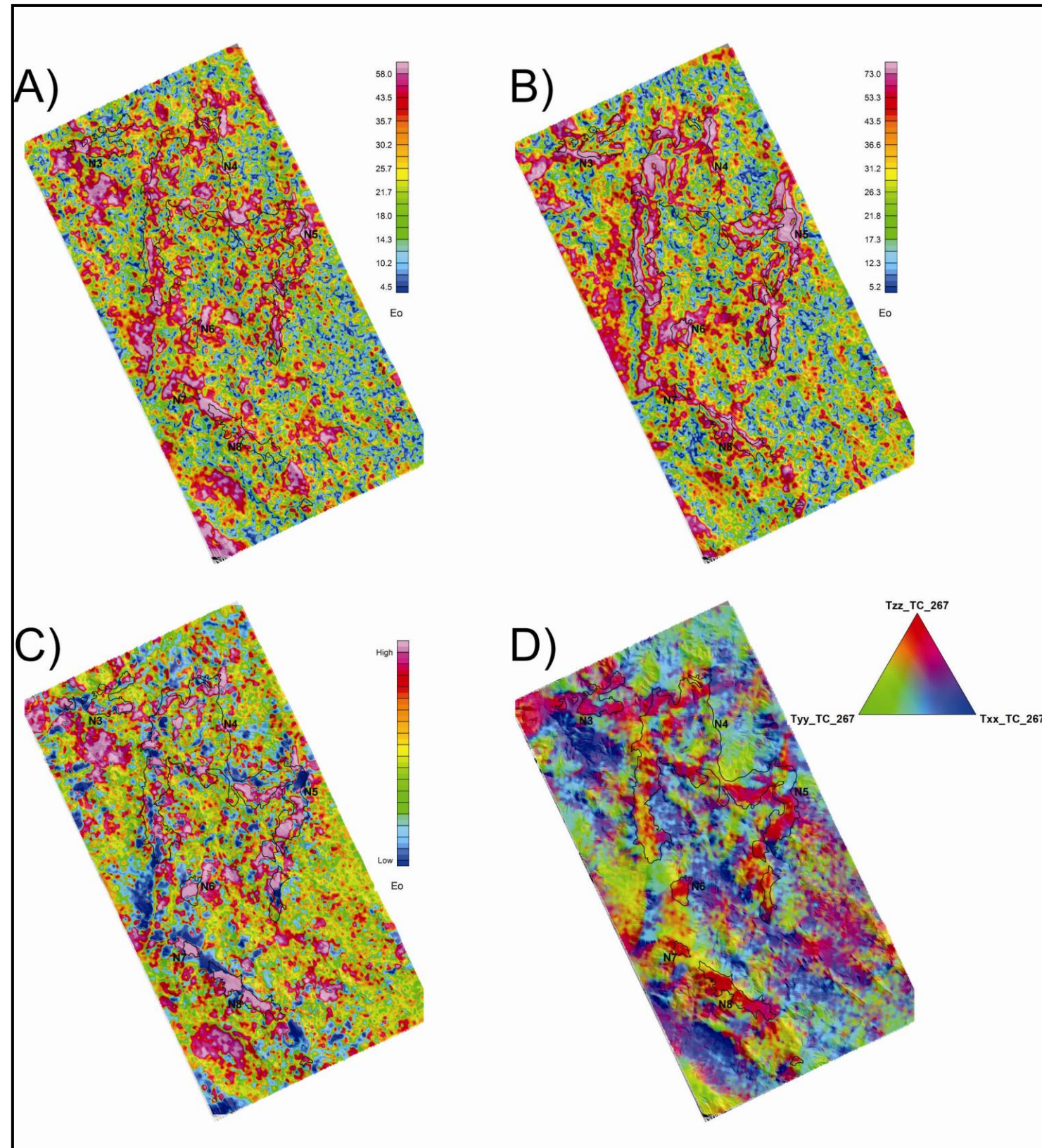
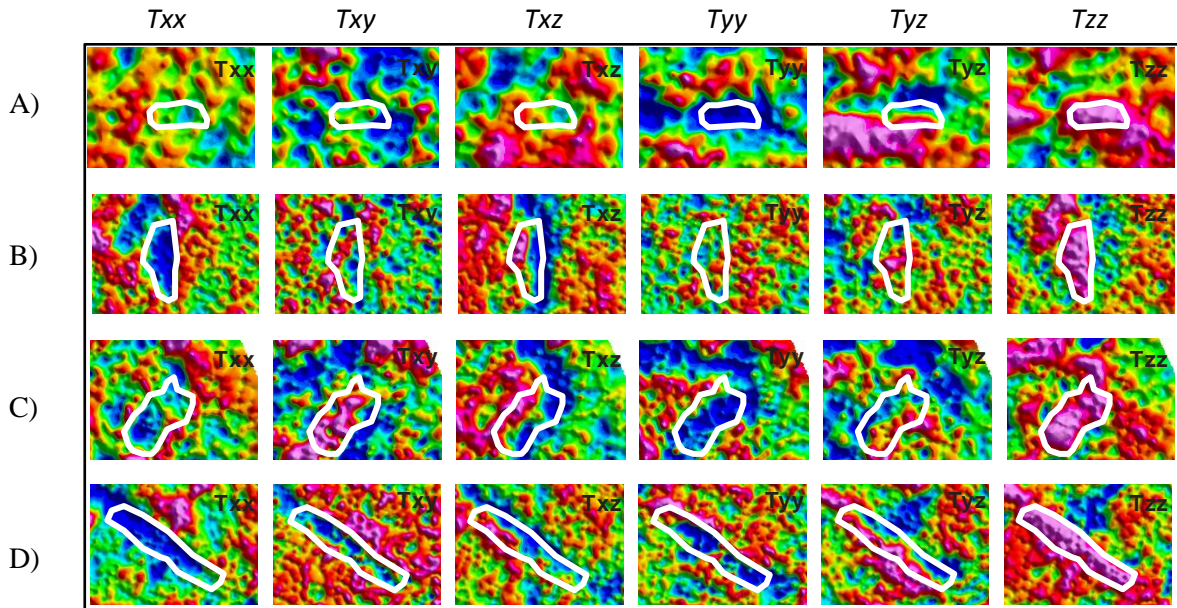


Figura 5-9: A) Grid do invariante com as componentes  $T_{xy}$ ,  $T_{xx}$  e  $T_{yy}$ , sobre o modelo digital de elevação; B) Grid do invariante com as componentes  $T_{xz}$  e  $T_{yz}$ ; C) Grid do produto da multiplicação das componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{zz}$ ; D) Composição falsa cor RGB  $T_{zz}T_{yy}T_{xx}$



**Figura 5-10: Resposta de cada componente em relação à geometria do alvo, A) Alvo de direção E-W; B) Alvo de direção N-S; C) Alvo de direção NE-SW; D) Alvo de direção NW-SE.**

Outra técnica que também foi empregada neste trabalho foi a inversão 3D a partir dos dados do aerolevamento 3D-FTG, onde foram selecionados os alvos N3, N6 e N8 que estavam no programa corrente de exploração *near mine* na região e não possuem atividades de mineração.

Para a inversão dos dados de gradiometria gravimétrica, foi aplicada a metodologia de Li & Oldenburg (1998), adaptada por Li (2001) para dados de gradiente de gravidade, através de software desenvolvido pela Colorado School of Mines. O algoritmo presume uma distribuição de densidade de células prismáticas com contraste de densidade constante. Em notação matricial o problema direto é dado por:

$$G\vec{m} = \vec{d} \tag{Equação 3}$$

em que  $\vec{m} = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m]^T$  é o vetor de parâmetros contendo os contrastes de densidade de cada prisma,  $\vec{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$  é o vetor dos dados teóricos dos gradientes de gravidade e G é a matriz sensibilidade ou matriz Jacobiana.

Li & Oldenburg (1998) e Li (2001) estimam a distribuição do contraste de densidade a partir dos dados medidos de gradiente de gravidade solucionando o problema de otimização de

minimizar

$$\phi = \phi_d + \mu\phi_m \tag{Equação 4a}$$

sujeito a

$$\bar{\rho}_{\min} \leq \bar{\rho} \leq \bar{\rho}_{\max} \tag{Equação 4b}$$

em que  $\mu$  é o parâmetro de regularização,  $\bar{\rho}_{\min}$  é o limite inferior de densidade e  $\bar{\rho}_{\max}$  é o limite superior de densidade.

Na equação 4a, a função do ajuste dos dados é dada por:

$$\phi_d = \|W_d(\vec{d} - \vec{d}^{obs})\|^2 \tag{Equação 5}$$

em que  $d^{obs}$  é o dado observado,  $d^{pred}$  é o dado predito e  $W_d$  é a matriz de pesos.

A função regularizadora na equação 4a é definida como:

$$\begin{aligned} \phi(\rho) = & \iiint (w(z)(\rho - \rho_0))^2 dv + L_x^2 \iiint \left(\frac{\partial w(z)(\rho - \rho_0)}{\partial x}\right)^2 dv + \\ & + L_y^2 \iiint \left(\frac{\partial w(z)(\rho - \rho_0)}{\partial y}\right)^2 dv + L_z^2 \iiint \left(\frac{\partial w(z)(\rho - \rho_0)}{\partial z}\right)^2 dv \end{aligned} \tag{Equação 6}$$

em que  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  definem a suavidade relativa em cada direção e  $\rho_0$  é o modelo de referência. A função  $w(z)$  é a função de pesos na forma

$$w(z) = \frac{1}{(\sqrt{z - z_0})^3} \tag{Equação 7}$$

utilizada para contra atuar na função kernel e impedir que a concentração dos máximos valores estimados dos contrastes de densidade fique restrito nas profundidades rasas. O método da barreira logarítmica utilizando a técnica do gradiente conjugado foi implementado para vincular os limites de densidade especificados na equação 4b. A função objetivo não vinculada a ser minimizada é:

$$\phi(\lambda) = \phi_d + \mu\phi_m - 2\lambda \sum_{i=1}^M [\ln(\rho_j - \rho_j^{\min}) + \ln(\rho_j^{\max} - \rho_j)] \quad \text{Equação 8}$$

em que  $\lambda$  é o parâmetro de barreira,  $\rho_j^{\min}$  e  $\rho_j^{\max}$  são, respectivamente, os limites inferior e superior para o j-ésimo prisma cujo j-ésimo contraste de densidade,  $\rho_j$ , é desconhecido.

Para a inversão da componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ , foi construída uma malha cuboidal com o tamanho adequado para cada corpo, colocando células além da área dos dados de cada modelo para evitar efeitos de borda. Como parâmetro de entrada foi utilizado um modelo de referência igual à zero. Para os limites superior e inferior de densidade foram utilizados 4,0 g/cm<sup>3</sup> e 2,8 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, para cobrir a faixa de valores das densidades esperadas para hematititos friáveis encontrados em Carajás. No processo de inversão foi utilizado o modelo digital de elevação (DEM). Os modelos obtidos a partir da inversão dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG podem ser observados na Figura 5-11, Figura 5-12 e Figura 5-13.



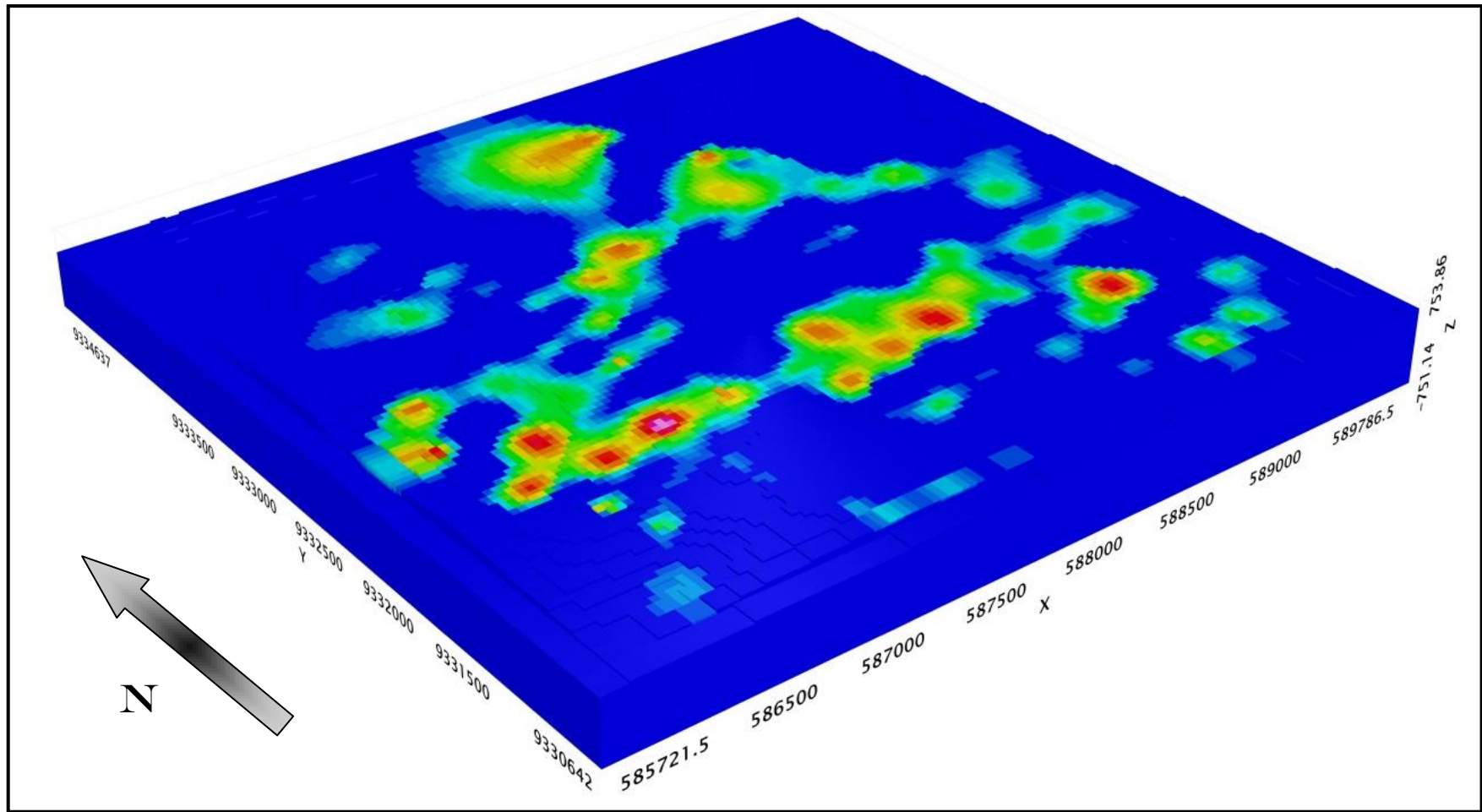


Figura 5-11: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N3, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels.

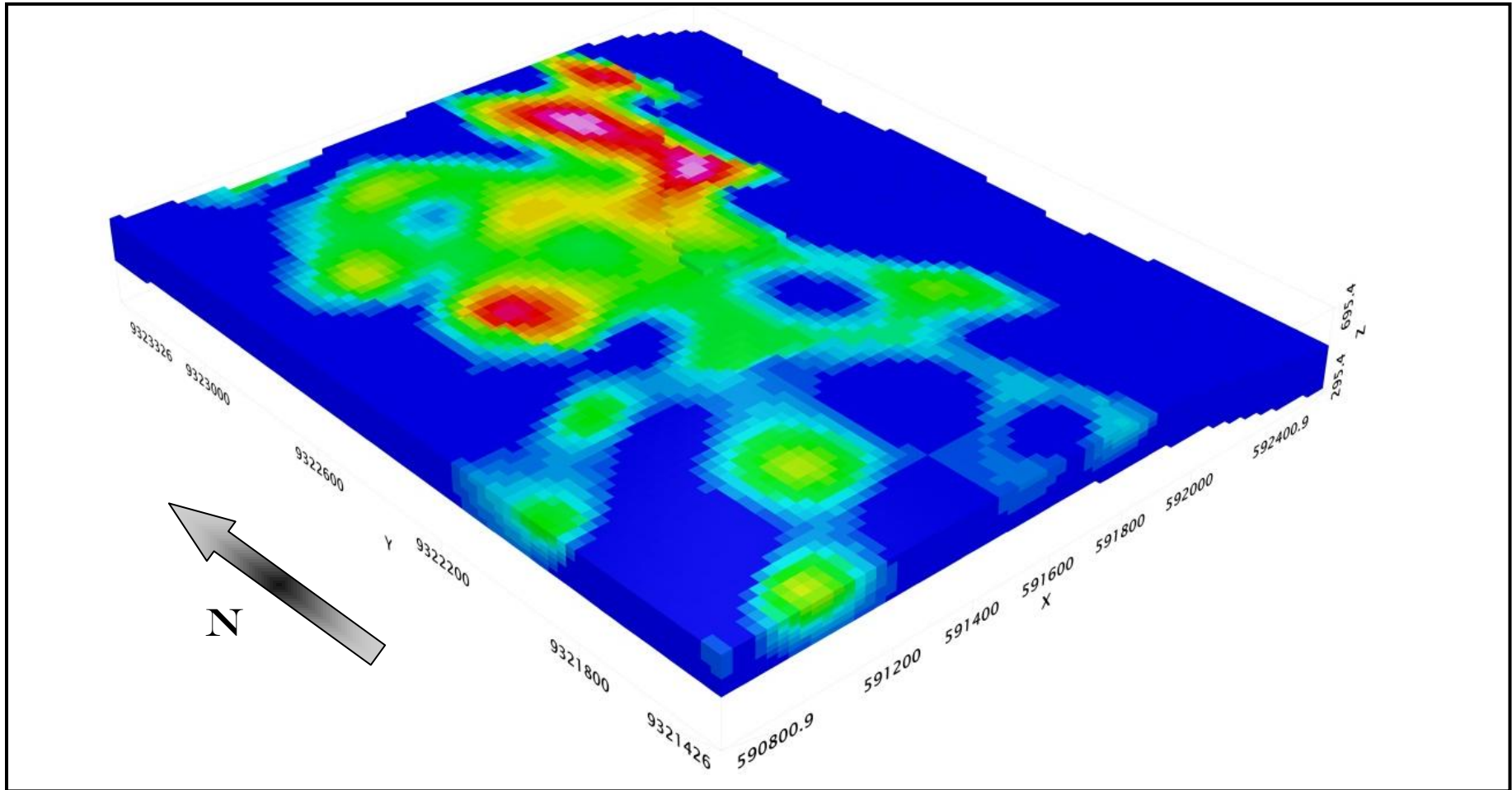


Figura 5-12: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N6, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels.

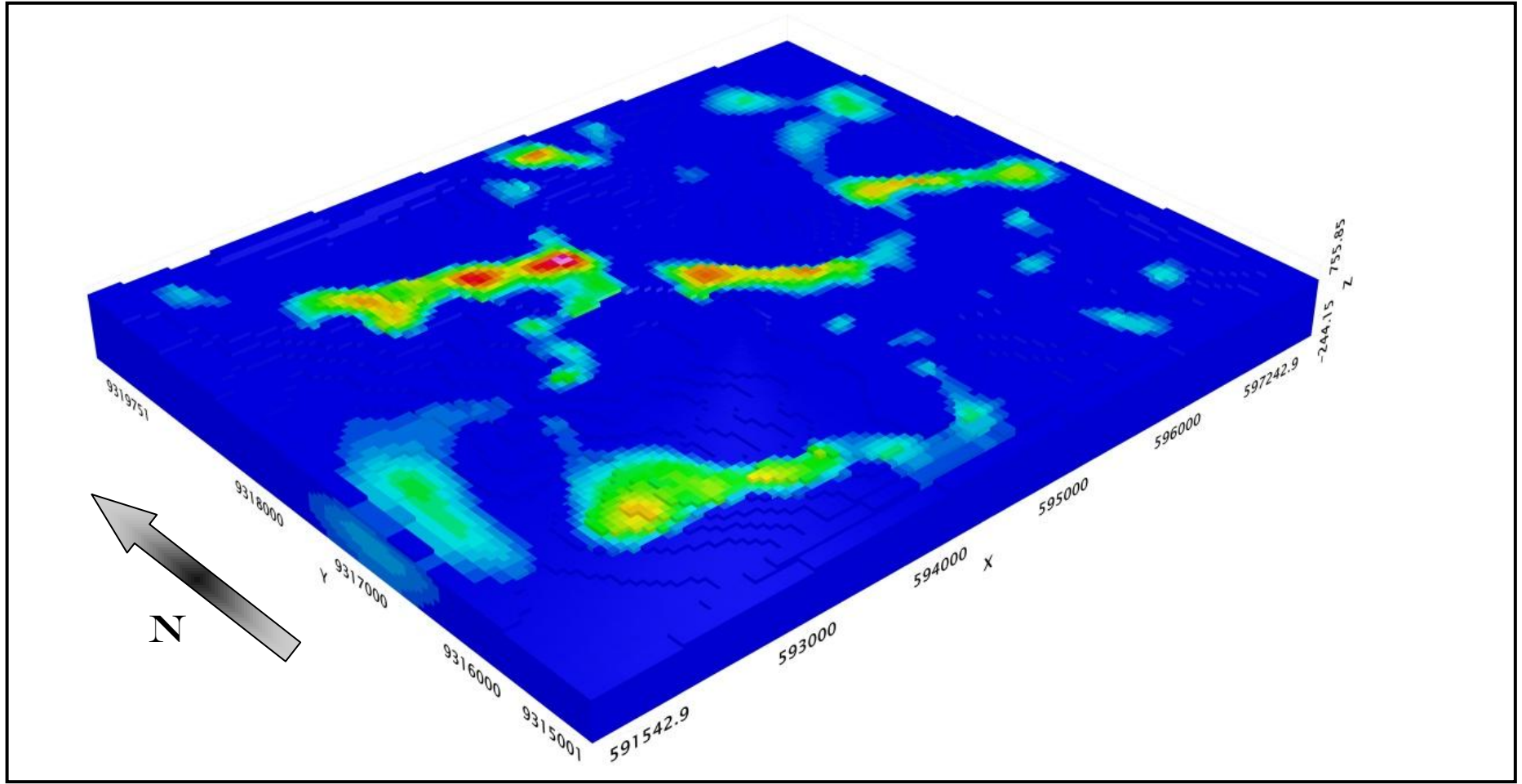


Figura 5-13: Resultado da inversão dos dados 3D-FTG para o depósito de N8, utilizando o software GG-3, em modelo tridimensional de voxels.

Para a geração dos modelos de inversão são assumidas premissas que terão impacto no resultado final, como exemplo, pode-se citar a profundidade estimada e o limite da envoltória das mineralizações e o intervalo alvo dos contrastes de densidades.

Como controle de qualidade do modelo de inversão é feita a comparação entre os dados observados e o que foi calculado pelo modelo. A Figura 6-5 apresenta as duas formas de visualização desta comparação, sendo uma através dos perfis das linhas observadas e calculadas e outra através das superfícies contínuas geradas a partir dos dados observados e calculados. Pode-se observar que no caso do exemplo mostrado, o modelo conseguiu reconstruir o sinal dos maiores comprimentos de onda, sendo considerado um bom ajuste.

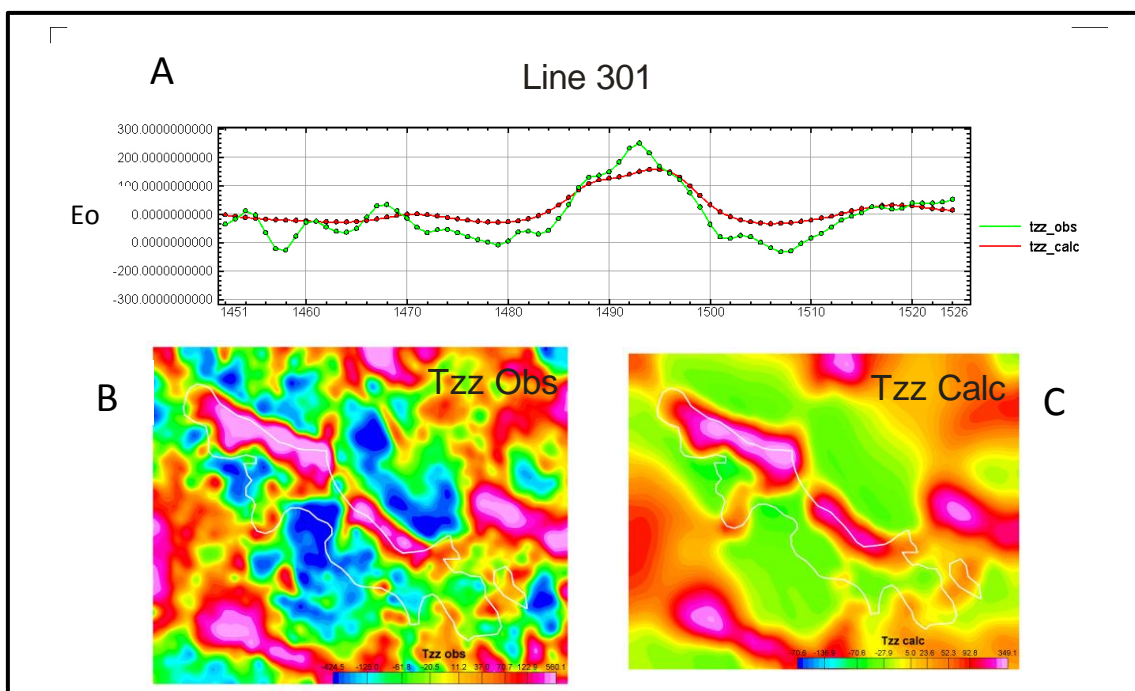


Figura 5-14: Soluções de controle de qualidade dos modelos de inversão a partir dos dados 3D-FTG. A) Perfis dos valores observados e calculados da componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ . Escala em Eotvos (Eo); B) Grid da componente  $T_{zz}$  observada; C) Grid da componente  $T_{zz}$  calculada.

### 5.2.3 Magnetometria

Para realçar os dados observados foi realizada a interpolação através do algoritmo de mínima curvatura com tamanho de célula de 50m do campo magnético anômalo e posteriormente geradas transformações lineares, a amplitude do sinal analítico e amplitude do gradiente horizontal (Figura 5-15).

A amplitude do sinal analítico é calculada a partir da equação sugerida por Roest et al. (1992)

Equação 9

onde  $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$  são as derivadas do campo magnético anômalo. A amplitude do sinal analítico possui baixa dependência dos parâmetros oriundos da geometria dos corpos e do campo magnético terrestre, desta forma, as anomalias ficam posicionadas sobre suas respectivas fontes (Nabghian, 1972, 1984; Roest et al., 1992). A amplitude do sinal analítico é uma ferramenta bastante útil, considerando que as formações ferríferas possuem alta susceptibilidade magnética, principalmente as que são ricas em magnetita, que é o caso dos jaspilitos de Carajás, que ainda não passaram pelo completo processo de enriquecimento supergênico ou metamorfismo mais abrangente.

Outra transformação linear utilizada foi a amplitude do gradiente horizontal total (AGHT), que tende a revelar os picos acima dos limites das fontes das anomalias e permite visualizar as variações de lateralidade em função das mudanças laterais abruptas de propriedades físicas, que podem estar relacionadas com mudanças litológicas e estruturais (Blakely & Simpson, 1986). O AGHT é dado pela seguinte equação (Phillips, 2000):

Equação 10

onde  $D_x$  e  $D_y$  são as derivadas do campo magnético anômalo em  $x$  e  $y$ .



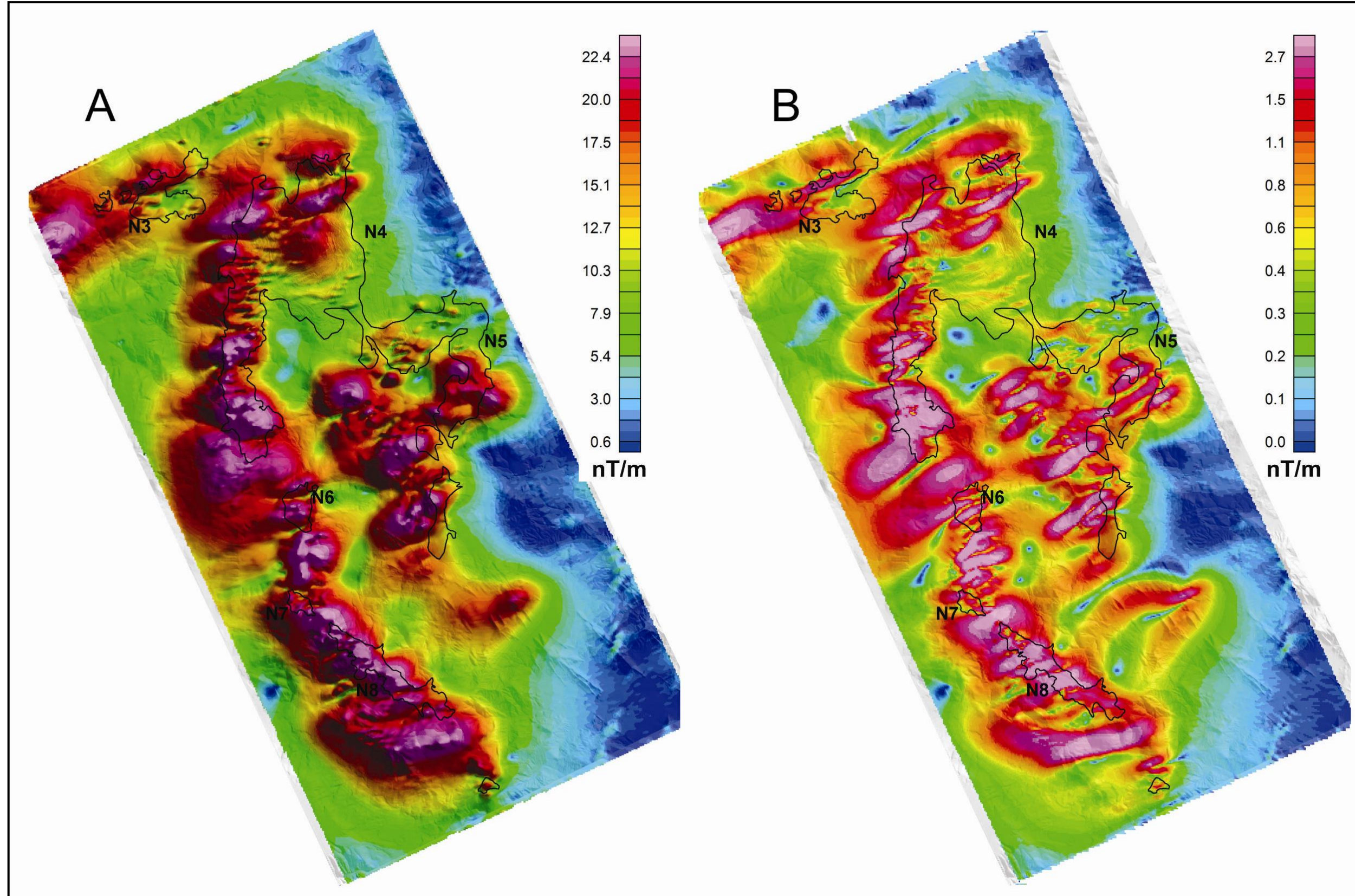


Figura 5-15: A) Grid da amplitude do sinal analítico de ordem zero, sobre modelo digital de elevação (DEM); B) A amplitude do gradiente horizontal total do campo magnético anômalo, sobre DEM.



Através da utilização do espectro de potência do campo magnético anômalo, foi verificada a distribuição das profundidades das fontes anômalas para a área deste trabalho, que ficaram na sua maioria entre 150 a 450 metros de profundidade, o que é bastante coerente com o esperado para as formações ferríferas nesta área.

#### 5.2.4 Gamaespectrometria

Os dados constantes do banco de dados fornecidos pela empresa executora foram entregues na forma de concentração aparente para os três radioelementos, potássio (K, em %), tório (eTh, em ppm) e urânio (eU, em ppm), sendo que todos apresentaram valores negativos em meio aos seus dados, o que foi corrigido através da adição de uma constante que os tornassem positivos, eliminando assim problemas nas operações matemáticas que foram aplicadas aos dados. Todos os valores dos radioelementos foram adicionados da constante 25.

Para o realce dos dados foram geradas as superfícies contínuas através da interpolação utilizando-se o algoritmo de mínima curvatura da contagem total (TC), dos radioelementos K, eTh e eU e das razões eTh/K, eU/eTh e eU/K, para realçar as coberturas lateríticas e colúvios de formações ferríferas (Boyle, 1982; Wildford et al., 1997; Zacchi et al., 2010), ainda foram geradas as imagens ternárias dos radioelementos e das razões entre os radioelementos (Figura 5-16 e Figura 5-17).

Outra técnica utilizada foi a determinação do fator F (Efimov, 1978), dado pela equação

— Equação 11

com o intuito de identificar zonas enriquecidas em K, em relação à razão eU/eTh, que podem estar relacionadas às zonas de alteração hidrotermal, como sugerido por Prichystal e Gnojeck (1985), cujo resultado pode ser observado na Figura 5-17.

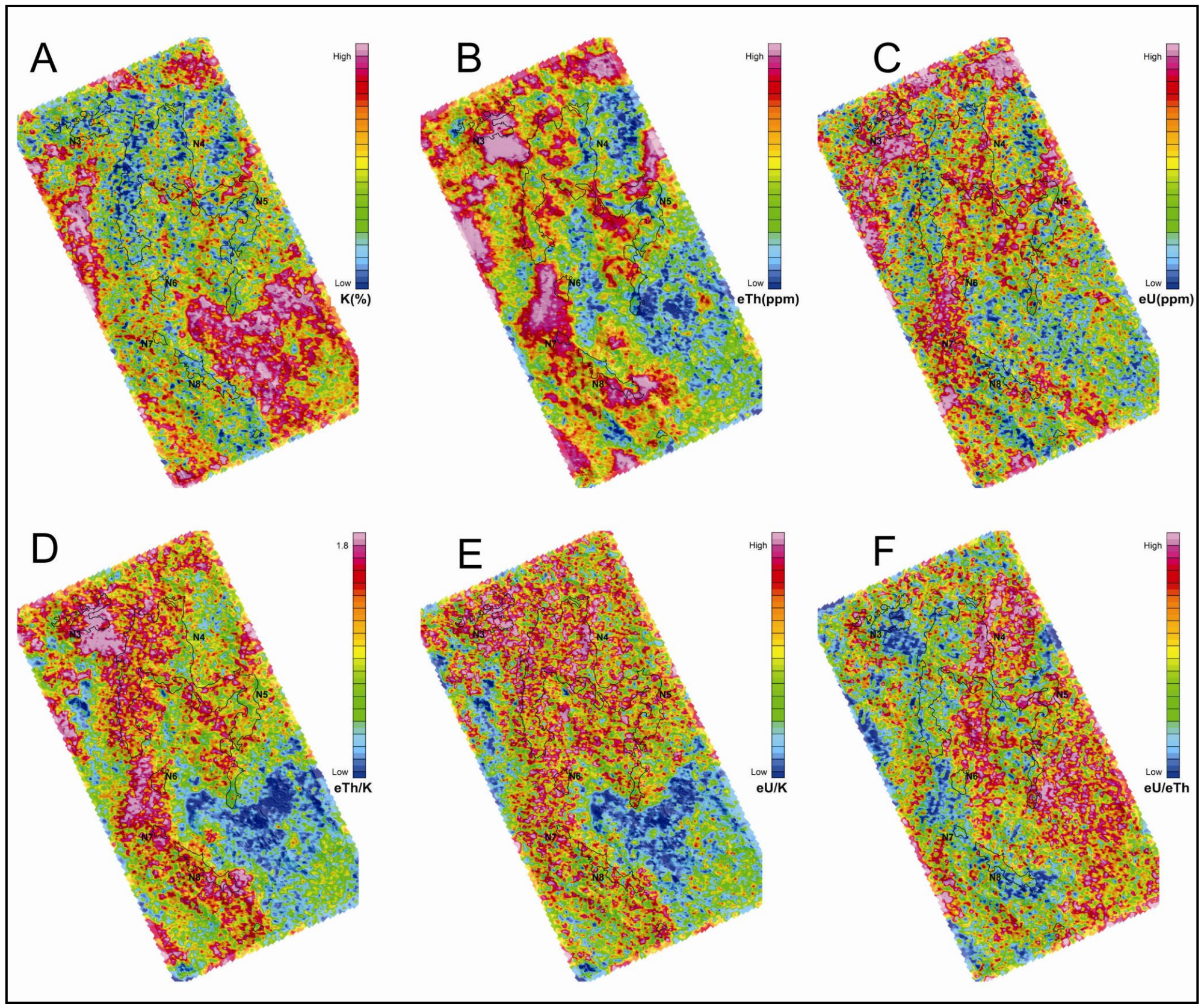


Figura 5-16: Realces aplicados sobre os dados gamaespectrométricos. A) Canal do potássio em percentual; B) Canal do equivalente tório em ppm; C) Canal do equivalente urânio em ppm; D) Razão eTh /K; E) Razão U/K; F) Razão eU/eTh.



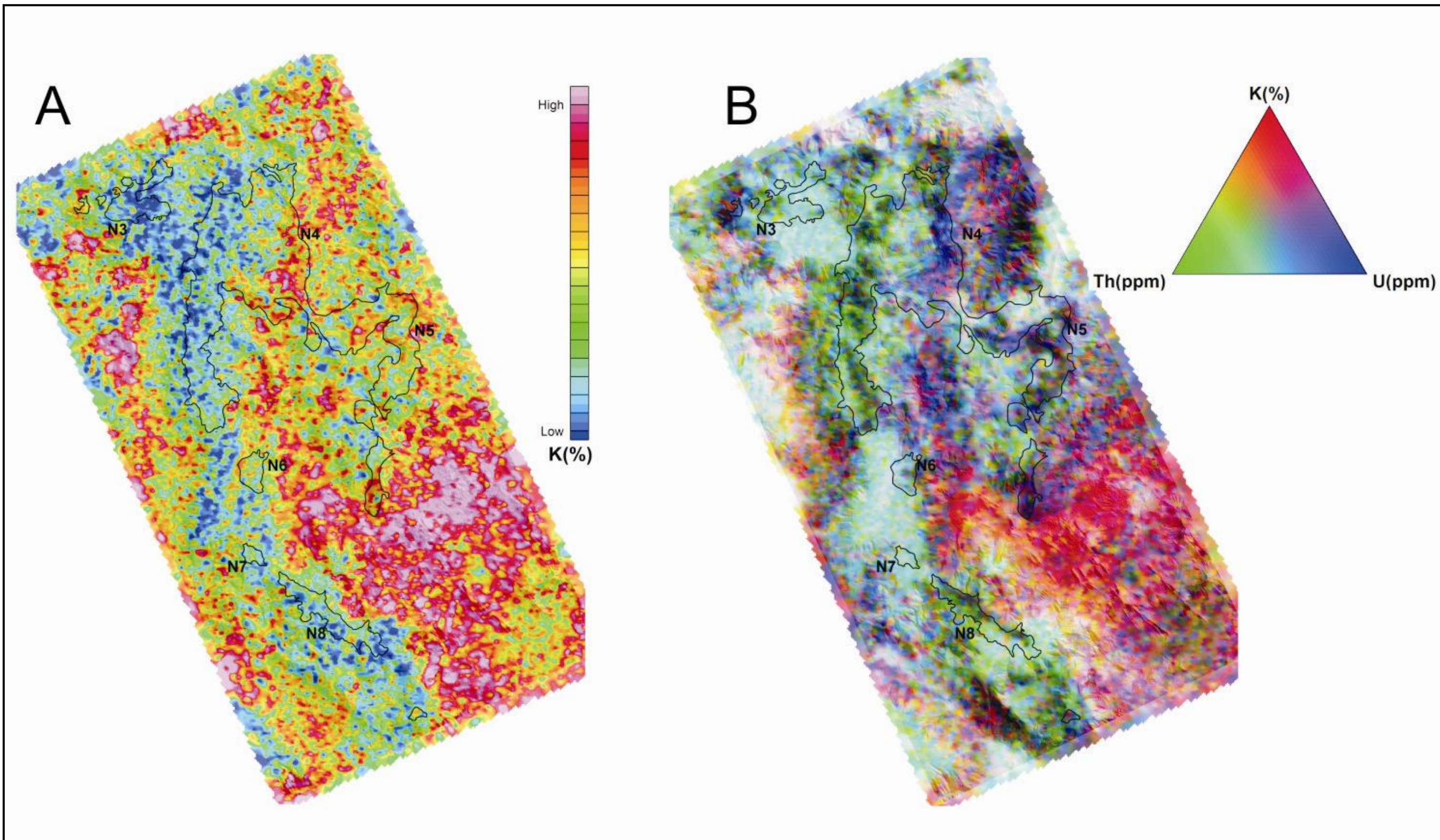


Figura 5-17: Realce aplicados sobre os dados gamaespectrométricos. A) Fator F; B) Composição colorida falsa cor RGB dos canais K, eTh e eU, respectivamente.

### 5.2.5 Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR)

Os dados LIDAR foram interpolados utilizando a metodologia *Topo to Raster*, disponível no *software* ArcGis, com células de tamanho de 2x2m (Figura 5-18). Este método utiliza uma técnica interativa de interpolação de diferenças finitas (Hutchinson et al., 2009), gerando modelos digitais de terreno (DEM, sigla em inglês de *Digital Elevation Model*) hidrologicamente corretos, propiciando estruturas de drenagens conectadas e correta representação das cristas e drenagens.



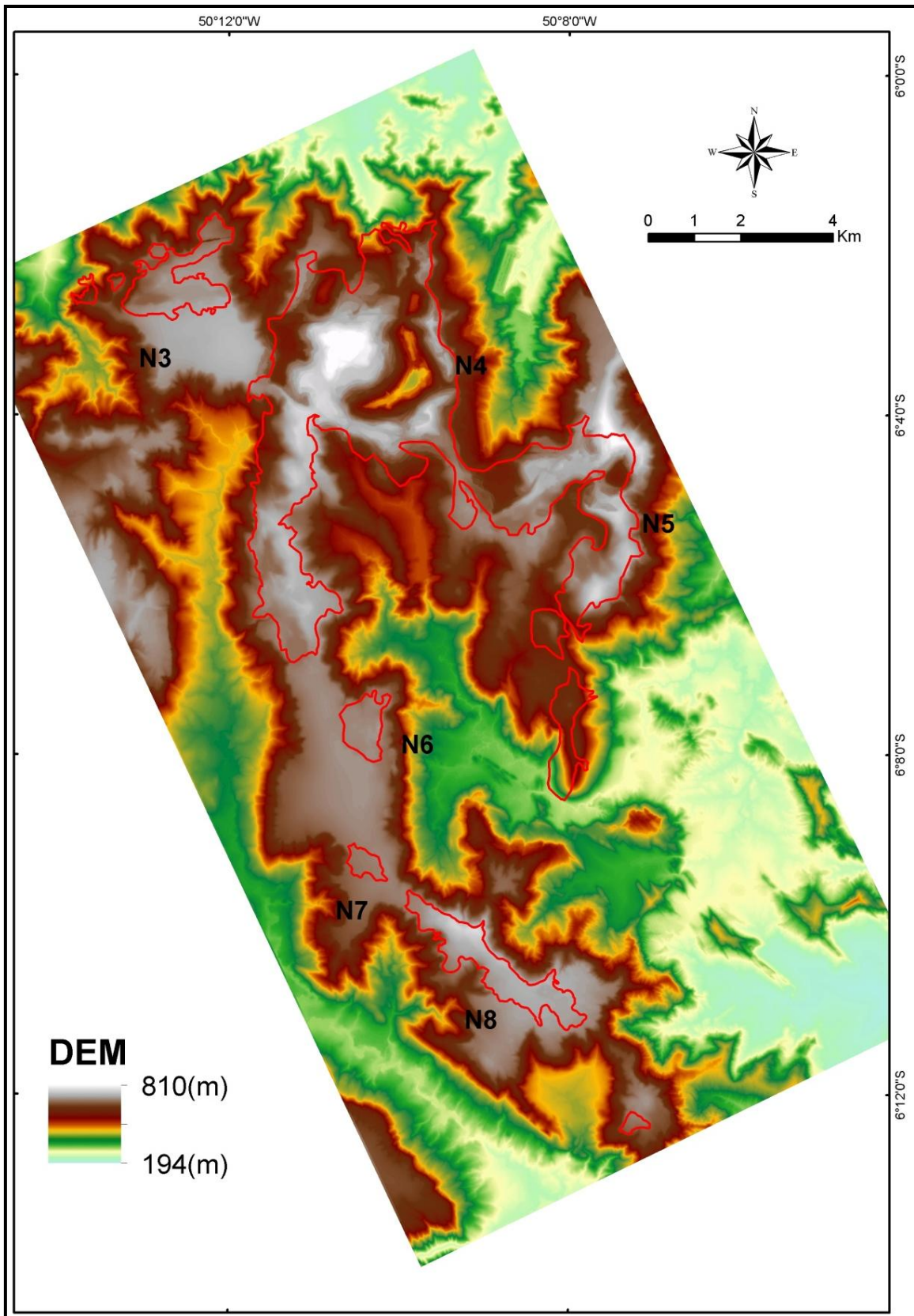


Figura 5-18: Modelo digital de elevação, gerado a partir dos dados LIDAR, onde se pode observar as clareiras delimitadas pelos polígonos em vermelho, onde estão alojados os depósitos de minério de ferro.

#### 4.1.1 Dados de Sondagem

Os dados de sondagem foram processados para gerar o modelo de voxels tridimensional dos litotipos interceptados na sondagem. Um voxel, sigla em inglês de *volumetric pixel* (Elemento de figura volumétrica), é um elemento de volume, que representa um valor em uma grade regular no espaço tridimensional (Lengyel, 2010). Para a geração do modelo de voxels foi necessário interpolar tridimensionalmente os dados de sondagem. Neste trabalho foi usada a metodologia de mínima curvatura para gerar os voxels com 25m de lado (Figura 5-19 e Figura 5-20).

Através do modelo de voxels dos litotipos pretende-se estabelecer vínculos com os produtos de processamento dos dados aerogeofísicos como forma de validar as interpretações realizadas.



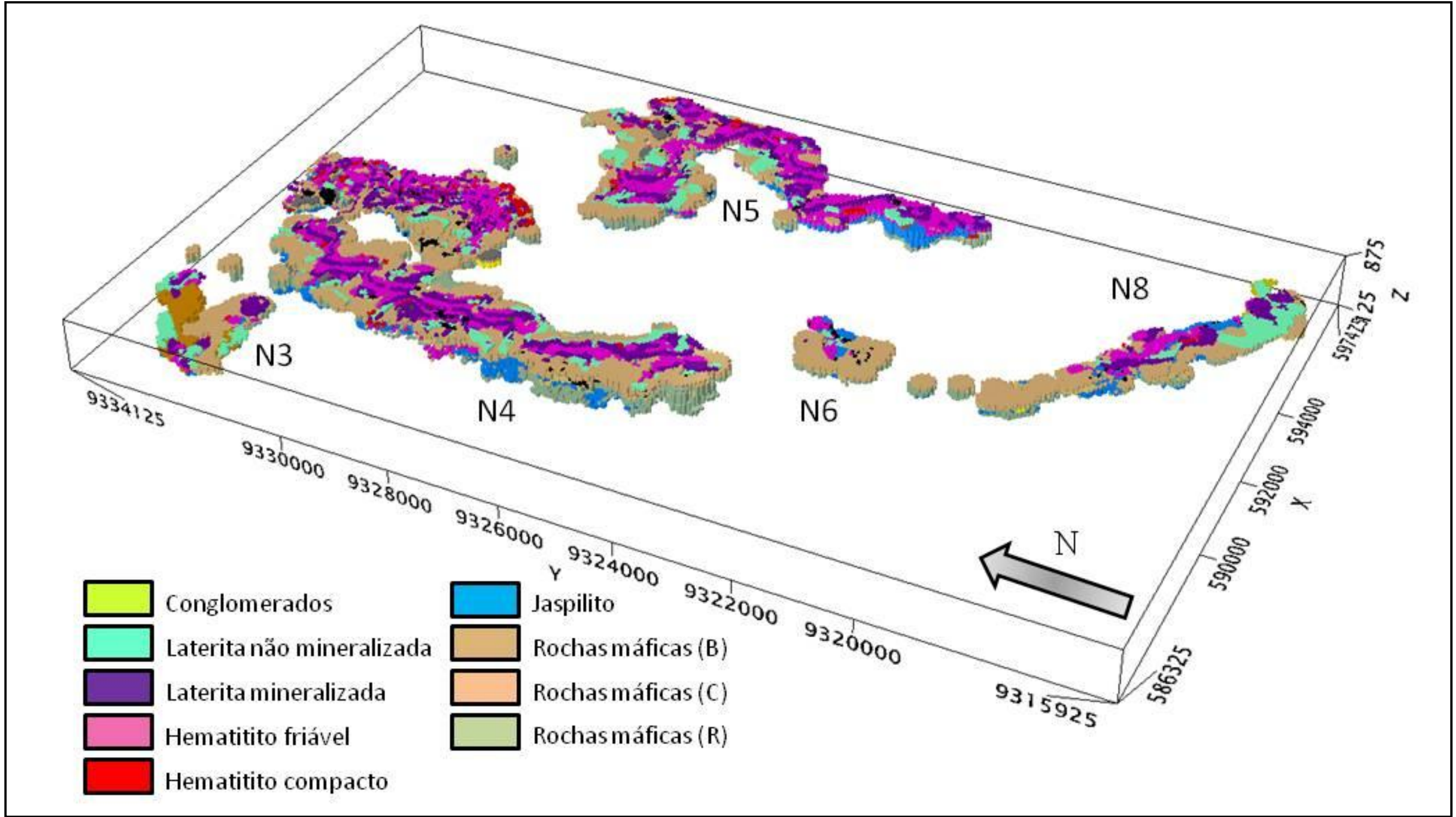


Figura 5-19: Modelo de voxels das litologias interceptadas nos furos de sonda em Serra Norte.

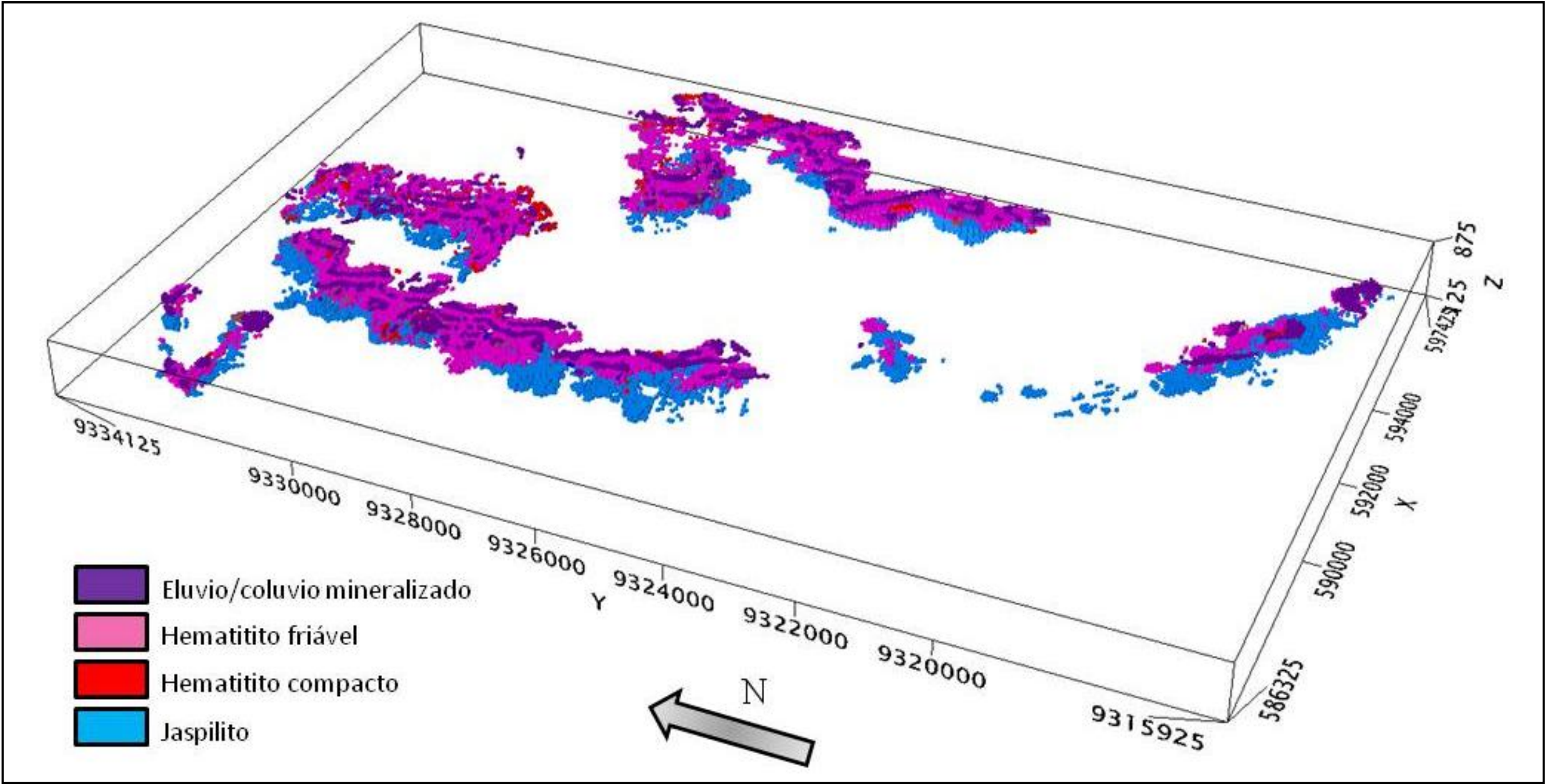


Figura 5-20: Modelo de voxels das formações ferríferas de Serra Norte.

## 6 Artigo Científico

### Uma Abordagem Exploratória para Minério de Ferro em Serra Norte, Carajás

#### 6.1 Abstract

This paper proposes an integrated exploration model for iron ore in the Serra Norte portion of Carajás Mineral Province (PMC), located in the state of Pará. PMC hosts some world class deposits and one of the largest iron ore mines in the world, N4, run by Vale S.A. mining company. The company is constantly running greenfield and brownfield exploration programs for this commodity in the whole Carajás region, aiming at keeping its market share in the transcontinental market. Gamma ray spectrometric data allowed us to individualize signatures associated with outcropping iron formations related to Carajás Formation, considering low levels of K, eU and eTh radioelements. The regolith signature associated to this unit shows eTh enriched plateaus. However, lateritic mantles related to mafic rocks, host rocks of this mineralization associated with Parauapebas and Igarapé Cigarra formations, are eTh and eU enriched. Clastic sedimentary rocks such as arcosean sandstones and conglomerates that cover Grão Pará Group showed high levels of K. By assessing airborne magnetic data it was possible to identify magnetic features and structures that are interesting from the prospective point of view. We can observe that highly mineralized bodies are not mapped or present a low gradient of amplitude in the analytic signal. By analyzing the results of magnetometric data, especially in the amplitude of the magnetic zero-order analytic signal, and due to the presence of magnetite and martite, we could notice the correlation between surface and subsurface iron formations with the anomalies observed. The validation with boreholes and voxel models using lithotypes obtained during drillings confirms this assumption and shows that magnetite is best associated with protore, and martite with iron ore. Occasionally the loss of magnetism can be observed due to the oxidation seen in iron ore. The gravimetric gradiometry of the Full Tensor Gravity Gradiometry (3D-FTG) system allowed designing the encasing of the anomalous body and interpreting the structural framework by means of the gravimetric gradient components. The three-dimensional modeling methodology based on the inversion of gradiometric gravimetry data was compared with the conventional geologic modeling and the results obtained were successful, since the difference of the amounts of mineral resources volumes obtained with both modeling methods was at about 20%. This confirms the reliability of the use of inversion model in the preliminary evaluations of mineral resources and also brings a safe direction and allows a better use of human and financial resources in iron ore exploration programs.



## 6.2 Introdução

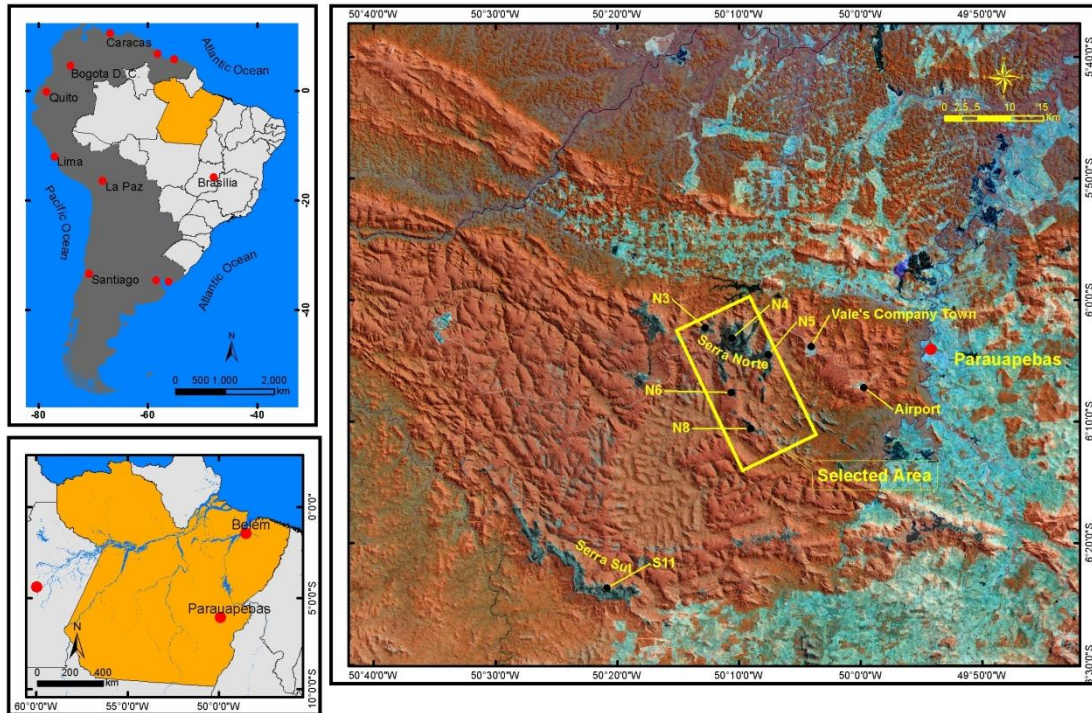
O minério de ferro é uma *commodity* em uso pela civilização desde tempos remotos, sendo que após a revolução industrial no século XVIII tornou-se um dos pilares do desenvolvimento da humanidade. Mais recentemente, no início do século XXI, o minério de ferro experimentou forte crescimento da demanda alavancado pelo crescimento do consumo nos países ricos e desenvolvimento dos países asiáticos, especialmente a China, elevando a alta de preços e disparando a corrida exploratória por todo o mundo. A reboque do cenário desenvolvimentista, os orçamentos das campanhas exploratórias para minério de ferro cresceram a fim de suprir a demanda mundial através de programas de reavaliação de depósitos com operação de mina, novas descobertas e avaliações de depósitos até então considerados marginais em função dos baixos teores e deficiência logística. Com a chegada da crise mundial no final da primeira década do século XXI, as empresas de mineração precisaram rever suas estratégias e iniciaram um ciclo de reestruturação através de reduções de custos e maior seletividade dos projetos.

Independente do cenário econômico, uma abordagem exploratória que permita estabelecer critérios que impactem em novas descobertas com redução de custos e agilidade tornou-se crucial na continuidade e implantação de novos projetos.

A aplicação de métodos potenciais vem apresentando melhorias significativas em função do rápido avanço da capacidade computacional de *hardware*, da redução dos custos de aquisição e do aumento da resolução espacial dos dados em função da evolução tecnológica dos equipamentos e plataformas aéreas de aquisição. Soma-se ainda à precisão de posicionamento conferida pelos modernos sistemas de posicionamento por satélite, além do avanço no campo da física que introduziu novas técnicas como aerogravimetria gradiométrica (Flis, 2008).

Esse trabalho tem como meta apresentar uma abordagem exploratória para o minério de ferro a partir da integração de dados gamaespectrométrico, magnetométrico e gravimétrico gradiométrico aéreos, utilizando o estado da arte em termos de metodologias de processamento e realce que auxiliem na seleção de alvos para exploração mineral para minério de ferro.

Como área teste, foi selecionada uma porção de Serra Norte, onde se localizam as minas de minério de ferro em exploração pela empresa Vale S.A. na Província Mineral de Carajás, sudeste do estado do Pará (Figura 6-1).



**Figura 6-1:** Mapa de localização da área de trabalho em Serra Norte, Província Mineral de Carajás, estado do Pará, Brasil. A área de trabalho está sobreposta à imagem Landsat ETM (RGB 453), mostrando as regiões de Serra Norte e Serra Sul.

Nesta porção de Serra Norte são encontrados cinco depósitos de minério de ferro, denominados, respectivamente, de N3, N4, N5, N6 e N8 (Figura 6-1). Os depósitos de N4 e N5 encontram-se em exploração desde o final dos anos 80, produzindo nos últimos anos cerca de 100Mt por ano. Os recursos minerais remanescentes auditados nesta região totalizam cerca de 4,2Gton@66,22%Fe (Valadão *et al.*, 2012).



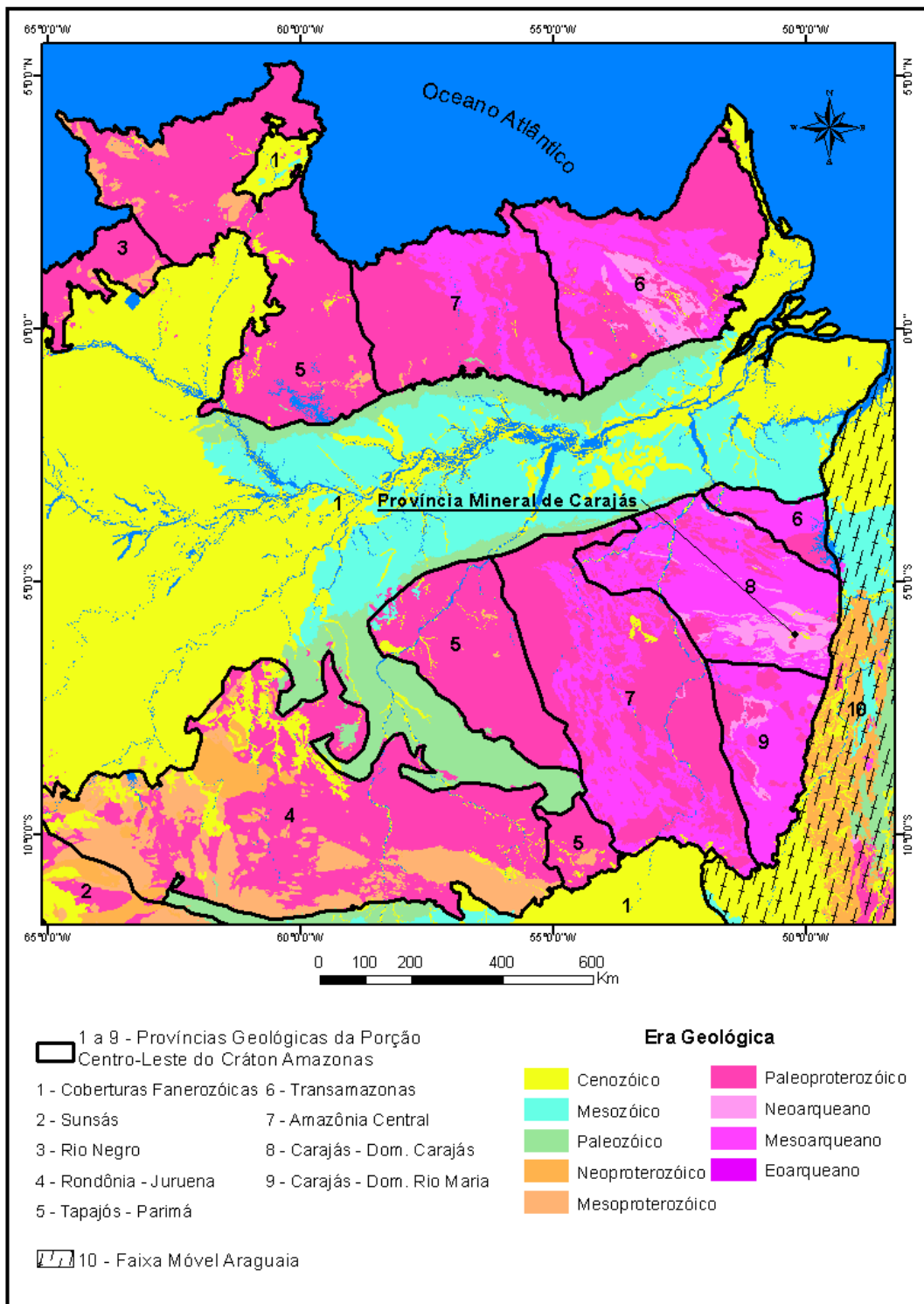
### 6.3 Contexto geológico e a gênese das formações ferríferas

A Província Geológica de Carajás está situada na porção leste-sudeste do Cráton Amazonas, de idade predominantemente Arqueana (Gibbs, 1986; Machado *et al.*, 1991). A província foi subdividida em dois domínios (Tassinari *et al.*, 1996; Bizzi *et al.*, 2003): o sul, denominado de Rio Maria, de idade Mesoarqueana e constituído por terrenos tipo granito-*greenstone*; e o domínio Norte, chamado de Carajás, de idade predominantemente Neoarqueana, constituído de sequências vulcanossedimentares e granitoides (Figura 6-2).

O domínio Carajás é delimitado a sul pelos terrenos granito-*greenstone* do domínio Rio Maria, estando recoberto a oeste por rochas de idade Mesoproterozóica pertencentes à província geológica Amazônia Central, a norte por rochas de idade paleoproterozóicas, pertencentes ao domínio Bacajá da província geológica Transamazonas e a leste pela faixa móvel Araguaia, de idade Neoproterozóica (Bizzi *et al.*, 2003).

Apesar do notável desenvolvimento do conhecimento geológico sobre a Província Mineral de Carajás, seus depósitos e mineralizações associadas ao longo das últimas décadas, a visão integrada do quadro geológico regional apresenta uma série de lacunas. Este fato, que decorre principalmente da falta de trabalhos de caráter regional, se expressa na forma de vários problemas, dentre os quais se destacam:

- a ausência de uma coluna estratigráfica de espectro regional e de ampla aceitação;
- um volume considerável de informações de detalhe sobre jazidas ou feições geológicas locais, sem ainda o apoio de um quadro geológico regional bem delineado;
- concepções muito distintas e conflitantes sobre a natureza e evolução dos vários depósitos minerais da região.



**Figura 6-2:** A figura ilustra o posicionamento tectônico da Província Mineral de Carajás (PMC) baseado em Tassinari & Macambira (1999) integrado com os dados do Brasil ao milionésimo de Bizzi *et al.* (2003).

As unidades Arqueanas mais antigas que representam o embasamento do domínio Carajás, conhecido como Complexo Xingu, é constituído por gnaisses de composição granítica, tonalítica e trondhjemítica, com anfibolitos intercalados e intrusões tonalíticas (Silva *et al.*, 1974) e idade c.a. 2.859±2 Ma (U-Pb, Zircão; Machado *et al.*, 1991), migmatizados em c.a. 2.851±4 Ma (U-Pb, Zircão; Machado *et al.*, 1991). Pequenos núcleos de ortogranulitos denominados Complexo Pium e idade c.a. de em 3.002±14 Ma (U-Pb, Zircão; Pidgeon *et al.*, 2000) podem ser individualizados na porção Sul do domínio Carajás (Araújo & Maia, 1991). Dados disponíveis na literatura mostram que o metamorfismo destas rochas ocorreu por volta de 2,8Ga (Machado *et al.*, 1991, Rodrigues *et al.*, 1992; Pimentel & Machado 1994; Pidgeon *et al.*, 2000) (Figura 6-3).

As supracrustais são representadas por uma sucessão de rochas vulcanossedimentares, representada pelo Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988), que congrega os grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia e Buritirama e que sustentam as serras e platôs da região de Carajás. Dentre essas unidades, destaca-se o Grupo Grão Pará e, nele, a Formação Carajás que é constituída de jaspilitos que hospedam os principais corpos de minério de ferro da província. Além da Formação Carajás, o Grupo Grão Pará conta ainda com a uma sequência vulcânica máfica na base denominada como Formação Parauapebas, e uma sequência vulcânica básica no topo conhecida como Formação Igarapé Cigarra (Macambira, 2003; Zuchetti, 2007) (Figura 6-3).

Essas unidades registram diferentes graus metamórficos, desde fácies xisto verde a anfibolito e/ou fácies granulito (DOCEGEO, 1988; Olszewski *et al.* 1989; Machado *et al.*, 1991) entre idades em torno de 2,68 e 2,57 Ga (*e.g.* Machado *et al.*, 1991; Souza *et al.*, 1996; Trendall *et al.*, 1998). Os dados geocronológicos disponíveis para o vulcanismo do Grupo Grão Pará mostram valores c.a. de 2,75 Ga (*e.g.* Wirth *et al.*, 1986; Machado *et al.*, 1991; Trendall *et al.*, 1998).

Beisiegel *et al.* (1973) divide o Grupo Grão Pará em duas sequências paleovulcânicas, inferior e superior, separadas pela Formação Carajás. A Sequência Paleovulcânica Inferior denominada pela Rio Doce Geologia e Mineração (1984) como Formação Parauapebas, é representada por rochas vulcânicas máficas, hidrotermalmente alteradas e com feições primárias preservadas, tais como amígdalas e textura intergranular.

A Sequência Paleovulcânica Superior, correspondente à Formação Igarapé Cigarra (Macambira, 2003; Zucchetti, 2007), é constituída por rochas vulcânicas básicas semelhantes àquelas da Sequência Paleovulcânica Inferior, das quais se diferencia por intercalações lenticulares de formação ferrífera. O posicionamento estratigráfico dessa formação no Grupo Grão Pará não é unanimidade entre os autores. Por exemplo, Teixeira (1994) e Teixeira *et al.* (1997) associam essa unidade ao Grupo Igarapé Bahia, posicionado acima do Grupo Grão Pará.

A Formação Carajás é composta de formações ferríferas bandadas (jaspilitos), minérios de ferro e seus produtos de alteração (Meirelles 1986, Lindenmayer *et al.* 2001, Klein e Ladeira 2002, Macambira, 2003; Figueiredo e Silva, 2004), que na Serra Norte, atingem espessuras médias entre torno de 200 e 250m (Zucchetti 2007) (Figura 6-3).

Depositado sobre o Grupo Grão Pará ocorre a bacia da Formação Águas Claras, uma sequência sedimentar, constituída por conglomerados, arenitos, dolomitos/calcários e siltitos cinza, vermelhos e carbonosos (Meireles *et al.*, 1982; Meireles e Silva, 1988, Araújo & Maia, 1991), com idade de deposição de c.a.  $2681 \pm 5$  (Trendall, 1998). Souza *et al.* (2001) sugere que a deposição ocorreu em ambiente de margem continental passiva como resultado de distensão regional (Figura 6-3).

Repousando discordantemente em relação às rochas do Supergrupo Itacaiúnas são observados os conglomerados polimíticos da Formação Gorotire, com idade máxima de deposição em torno de 2,0Ga (Monteiro *et al.*, 2004). Pereira (2009) sugere que os conglomerados na região da Serra dos Carajás não sejam pertencentes à Formação Gorotire, propondo a criação de nova unidade denominada de Formação Caninana, com idade de deposição mínima de 1,8Ga e máxima de  $2,11 \pm 25$  Ga. No entanto, nesse trabalho será adotada a denominação de Gorotire (Figura 6-3).

Suítes graníticas de idades c.a 2,7Ga (Avelar *et al.*, 1999) e 2,5 Ga (Machado *et al.*, 1991), representadas pelas unidades intrusivas Plaquê, Estrela, Planalto e monzogranitos da unidade Velho Salobo cortam as unidades mais antigas. São mapeados granitos pórfiros anorogênicos de idade 1,8Ga (Machado *et al.*, 1991) representados pelas unidades Serra dos Carajás e Cigano (Figura 6-3).



A gênese dos minérios de ferro da PMC ainda é amplamente discutida entre os autores e destacam três modelos básicos: supergênico, hipogênico e hipogênico modificado.

Para Tolbert *et al.* (1971), a lixiviação por águas meteóricas foi o responsável por retirar a sílica das formações ferríferas, resultando no enriquecimento residual em óxidos de ferro e na formação dos atuais corpos de minério.

Beisiegel *et al.* (1973) propõem origens distintas para os diferentes minérios da PMC. Para os hematitos compactos, os autores sugerem um modelo hipogênico que advoga o envolvimento de fluidos hidrotermais como causadores da substituição metassomática do quartzo. Para os minérios friáveis, postulam o enriquecimento supergênico. Uma origem supergênica para os minérios de ferro também é defendida por Dardenne e Schobbenhaus (2001). Para estes autores, o minério formou-se pela atuação dos mecanismos de alteração laterítica, com a lixiviação supergênica da sílica dos jaspilitos e uma concentração residual da hematita.

A atuação de fluidos hidrotermais como responsáveis pelas mineralizações de ferro também é postulada por Dalstra & Guedes (2004), Rosière *et al.* (2004, 2005), Lobato *et al.* (2005a, 2005b). Para Rosière *et al.* (2004, 2005), existe ainda um controle estrutural nessas mineralizações, visto que os grandes corpos desenvolveram-se em zonas de maior permeabilidade, ou seja, na zona de charneira do sinforme de Carajás.

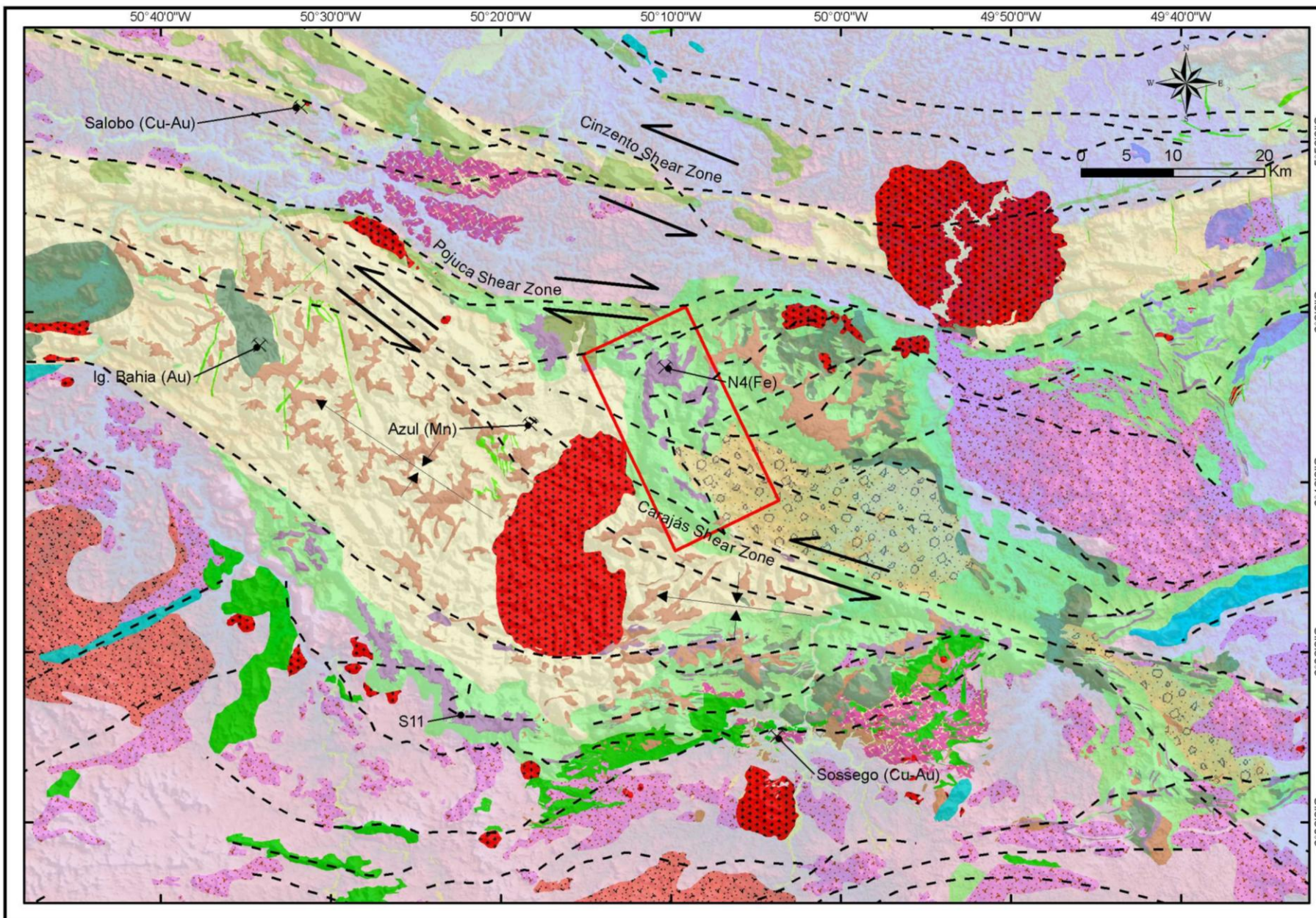
Em termos de abrangência, as formações ferríferas na PMC encontram-se em platôs sustentados por crostas lateríticas que se dispõem ao longo de destacadas elevações, de topos normalmente desconectadas. O conjunto destas elevações posiciona-se em três cadeias principais que são designadas como Serra Norte, Serra Sul e Serra Leste, assim chamadas conforme sua posição em relação ao conjunto montanhoso da serra dos Carajás.

Na Serra Norte, os platôs são nomeados de N1 a N9, sendo que se têm minas de ferro em operação apenas nos platôs de N4 e N5. As demais áreas (N1, N2, N3, N6, N7, N8 e N9) são áreas pouco impactadas e vem sendo alvo de pesquisa nos últimos anos.

Nas Figura 6-3 são apresentados o mapa geológico regional e respectivo empilhamento estratigráfico, modificados a partir de Bizzi *et al.*(2003), considerando os trabalhos desenvolvidos por Macambira (2003) e Pereira (2009), relatórios internos, bem como interpretações derivadas de dados gamaespectrométricos e magnetométricos disponíveis para a região.



A



B

Supergrupo	Grupo	Formação	Litotipos	Cor/Mapa	Era Máxima	Idade (Ma)	Método	Material	Referência
Depósitos Aluvionares			Areia, Cascalho	[Amarelo]	Cenozóico	0,875	Relações de campo	-	Bizzi <i>et al.</i> (2003)
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas			Aglomerado, Areia, Argila, Laterita	[Cinza]	Cenozóico	23,5	Relações de campo	-	Bizzi <i>et al.</i> (2003)
		Gorotire	Conglomerados e arenitos	[Cinza]	Paleoproterozóico	2,011 ± 25	U-Pb	Zircão detrítico	Monteiro <i>et al.</i> (2004)
		Aguas Claras	Conglomerados, arenitos, siltitos e pelitos	[Amarelo]	Neoarqueano	2,681 ± 5	U-Pb	zircão detrítico	Trendall <i>et al.</i> (1998)
Itacaiunas	Igarapé Bahia		Formações ferríferas, vulcânicas máficas e félsicas, dioritos e tufo	[Verde]	Neoarqueano	2,747 ± 2	Pb-Pb	zircão	Galarza <i>et al.</i> (2001)
		Igarapé Cigarra	Basaltos, tufo máficos, arenitos e formações ferríferas	[Verde]	Neoarqueano	2,747 ± 1	Correlação Estratigráfica		Macambira (2003)
	Grão Pará	Carajás	Formações ferríferas bandadas	[Verde]	Neoarqueano	2,759 ± 2	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)
		Parauapebas	Metabasalto, Metarriolito, Metadacito	[Verde]	Neoarqueano				
		Pojuca Salobo	Seqüência metavulcano sedimentar tipo <i>greenstone belt</i>	[Verde]	Neoarqueano	2,761 ± 3	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)
Andorinhas	Aquiri Rio Novo Sapucaia Tapirapé Sequerinho	Quartzito, filitos, Ultramáficas, máficas, metavulcânicas ácidas, formações ferríferas e metassedimentos clásticos	[Verde]	Mesoarqueano	< 2,943 ± 18	U-Pb	zircão detrítico	Pidgeon <i>et al.</i> (2000)	
Complexo Xingu				[Verde]	Mesoarqueano	2,851 ± 4	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)
Complexo Pium			Ganaisses, migmatitos, granulitos e anfibolitos	[Verde]	Mesoarqueano	3,002±14	U-Pb	zircão	Pidgeon <i>et al.</i> (2000)

Intrusivas	Dique	Gabro	[Verde]	Eopaleozóico	500			Bizzi <i>et al.</i> (2003)
	Dique	Basalto, andesito e riolito	[Verde]	Paleoproterozóico	1.800			Zuchetti (2007)
	Granitos anorogênicos tipo Serra dos Carajás e Cigano	Álcali-feldspato Granito Pórfiro, Granito Pórfiro	[Verde]	Paleoproterozóico	1,880 ± 2	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Suíte Santa Inês	Gabros	[Verde]	Paleoproterozóico				Araújo e Maia (1991)
	Suíte intrusiva ultramáficas Cateté / Vermelho	Serpentinitos, Peridotitos, piroxenitos, gabros e dunitos	[Verde]	Paleoproterozóico	2,378±55	Sm-Nd	Rocha Total	Macambira (1996)
	Granitóides tipo Velho Salobo	Monzogranito	[Verde]	Paleoproterozóico	2,573±2	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)
	Suíte granitóide tipo Plaqué, Estrela e Planalto	Granodiorito, Monzogranito, Sienogranito	[Verde]	Neoarqueano	2,736±24	U-Pb	zircão	Avelar <i>et al.</i> (1999)
	Complexo máfico-ultramáfico acamadado tipo Luanga	Anortosito, Dunito, Gabro, Harzburgito, Norito, Peridotito, Cromitito	[Verde]	Neoarqueano	2,763±6	U-Pb	zircão	Machado <i>et al.</i> (1991)

--- Lineamentos estruturais    ↖ Sinclinal    ⇨ Zona de cisalhamento dextral    ⇩ Zona de cisalhamento sinistral

Figura 6-3: A) Mapa geológico regional modificado de Bizzi *et al.* (2003) com base em Macambira (2003), Pereira (2009) e interpretações geradas a partir de dados magnetométricos e gamaespectrométricos. B): Legenda e coluna cronolitoestratigráfica de parte do domínio Carajás (Modificada de Macambira, 2003; Bizzi *et al.*, 2003; Zuchetti, 2007; Pereira, 2009).



A estruturação geral da Serra dos Carajás foi originalmente descrita como um sinclínório falhado de eixo WNW-ESE (Figura 6-3), cujos flancos são constituídos pelas formações ferríferas intercaladas por rochas vulcânicas máficas (Tolbert *et al.*, 1971; Beisegel *et al.* 1973).

Araújo *et al.* (1988) e Araújo e Maia (1991) definem como principal estrutura da PMC o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas. De orientação geral E-W, esse cinturão seria formado, na porção norte, pelos sistemas transcorrentes Serra dos Carajás e Cinzento e, na porção sul, por um domínio imbricado (Figura 6-3). O sistema Serra dos Carajás, que envolve principalmente as rochas do Grupo Grão Pará, corresponderia a um grande sigmóide alongado na direção WNW-ESE e limitado pelas serras Norte e Sul. A sua estrutura interna é interpretada pelos autores como uma flor positiva, produzida por um binário cisalhante sinistral. O Sistema Cinzento, que afeta rochas do Grupo Salobo, Aguas Claras, do Complexo Xingu e do Gnaiss Estrela, abarca os corpos de minério de ferro das Serra Norte (denominados N1 a N9) e Leste. O domínio imbricado, que se estende da borda sul da Serra dos Carajás até a região de passagem para o terreno granito-greenstone Rio Maria, desenvolveu-se sobre rochas do Complexo Xingu, granitóides isolados e lentes de supracrustais (Bizzi *et al.*, 2003).

Pinheiro (1997) propõe para a região da PMC uma evolução tectônica que se inicia com a ação de um regime transpressivo sinistral dúctil afetando o embasamento na chamada Zona de Cisalhamento Itacaiúnas por volta de 2.8Ga. Posteriormente, a região teria sido submetida a um segundo evento transpressivo sinistral, que gerou a deformação e o metamorfismo das rochas do Grupo Igarapé Pojuca. Uma extensa bacia intracratônica é formada por volta de 2.7Ga, onde teria lugar a deposição e vulcanismo registrados pelo Grupo Grão Pará. Por volta de 2.6Ga um tectonismo transtrativo dextral afetaria todas as unidades e levaria ao desenvolvimento dos sistemas transcorrentes Carajás e Cinzento, além da nucleação da Falha Carajás. No paleoproterozóico (entre 2.6 e 1.9Ga) uma reativação transpressiva sinistral da Falha Carajás propiciaria a inversão parcial do sistema.

Segundo Rosière *et al.* (2005), uma análise das estruturas em macro e meso escalas da região da PMC indica uma superposição de eventos, que tomando por base dados até



então existentes, investigação estrutural de detalhe e regional, fundamentada em dados derivados de sensores remotos , postulam que a estrutura geral da província consiste de um conjunto de dobras regionais de traço axial WNW-ESE, truncadas por zonas de cisalhamento rúptil-dúcteis regionais.

## 6.4 Materiais e métodos

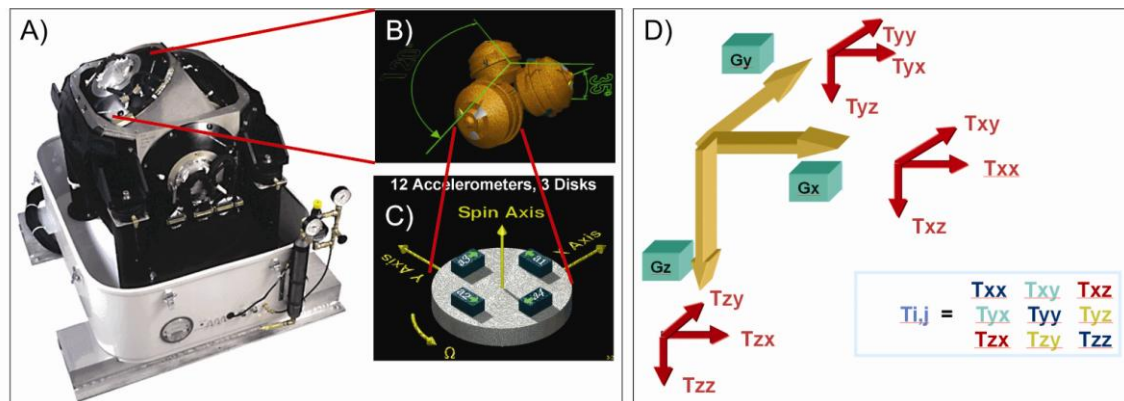
Para a realização deste trabalho foram utilizadas bases de dados dos levantamentos aerogeofísicos *Full Tensor Gravity Gradiometry* (3D-FTG), magnetométrico e gamaespectrométrico. Como bases de dados auxiliares foram utilizados mapas geológicos, dados de densidade, dados de campanhas de sondagem, bem como, os dados do aerolevanteamento *Laser Imaging Detection and Ranging* (LIDAR) que compuseram os modelos digitais de elevação (DEM).

### Gradiometria gravimétrica

O aerolevanteamento 3D-FTG recobriu uma área de 276Km<sup>2</sup> (12Km x 23Km), através da execução de 79 linhas de voo, cobrindo as áreas abertas com coberturas lateríticas e vegetação rupestres das clareiras de nomes N3, N4, N5, N6, N7, N8 e N9. O aerolevanteamento foi realizado segundo a direção N25W, com altura de voo de 150m em relação ao terreno e espaçamento entre linhas de 150m.

A direção das linhas de voo foi definida para que tentativamente, ficassem alinhadas com as principais feições fisiográficas de Serra Norte, garantindo menor interferência do relevo na aquisição dos dados, conforme sugerido por Braga et al. (2009).

O sistema 3D-FTG (Figura 6-4) é uma plataforma móvel, inserida numa cápsula aeronáutica e é composto por 12 acelerômetros, dispostos igualmente em 3 instrumentos de gradiente da gravidade (IGG) que medem as 5 componentes independentes do gradiente da gravidade,  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$ ,  $T_{zz}$ ,  $T_{xx}$  ou  $T_{yy}$  e, representando a taxa de variação das componentes  $G_x$ ,  $G_y$  e  $G_z$ , que por sua vez, representam a aceleração da gravidade ao longo dos eixos cartesianos (Murphy, 2004; Galbiatti *et al.*, 2011).



**Figura 6-4: Sistema 3D-FTG, mostrando: A) Cápsula; B) IGG's; C) Acelerômetros; D) Componentes do gradiente da gravidade na direção dos três eixos cartesianos (Modificado de Murphy, 2004).**

Os dados adquiridos no aerolevanteamento 3D-FTG passaram pelo processo de nivelamento, redução do ruído dos tensores e correção topográfica. A correção topográfica é importante para reduzir o efeito das feições fisiográficas no sinal oriundo das feições geológicas. A empresa executora do aerolevanteamento e a Vale S.A. possuem metodologia proprietária de correção do relevo, utilizando-se da modelagem com grids e prismas 3-D (Mataragio *et al.*, 2011).

Para a área deste aerolevanteamento a densidade de  $2,67 \text{ g/cm}^3$  foi a que apresentou o melhor resultado na eliminação do efeito da fisiografia nos dados *free air* medidos. Desta forma, foram gerados os grids de todas as componentes do gradiente gravimétrico para que fosse realizada a avaliação e a interpretação. Seguindo a técnica sugerida por Pedersen & Rasmussen (1990), modificada por Murphy (2007), foram gerados os invariantes utilizando as componentes horizontais com o intuito de realçar as altas frequências que possuem maior confiança com o mapeamento geológico.

Adicionalmente, foi empregada neste trabalho a inversão 3D a partir dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG, conforme metodologia de Li & Oldenburg (1998), adaptada por Li (2001) para dados de gradiente de gravidade, sendo que foram selecionados os alvos N3, N6 e N8 como áreas teste. Para a inversão da componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ , foi construída uma malha cuboidal com o tamanho adequado para cada corpo, colocando células além da área dos dados de cada modelo para evitar efeitos de borda. Como parâmetro de entrada foi utilizado um modelo de referência igual à zero. Para os limites superior e inferior de densidade foram utilizados  $4,0 \text{ g/cm}^3$

e 2,8 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, para cobrir a faixa de valores das densidades esperadas para hematititos friáveis encontrados em Carajás.

Como controle de qualidade do modelo de inversão é feita a comparação entre os dados observados e o que foi calculado pelo modelo. A Figura 6-5 apresenta duas formas de visualização desta comparação, sendo uma através dos perfis das linhas observadas e calculadas e outra através das superfícies contínuas geradas a partir dos dados observados e calculados. Pode-se observar que no caso do exemplo mostrado, o modelo conseguiu reconstruir o sinal dos maiores comprimentos de onda, sendo considerado um bom ajuste.

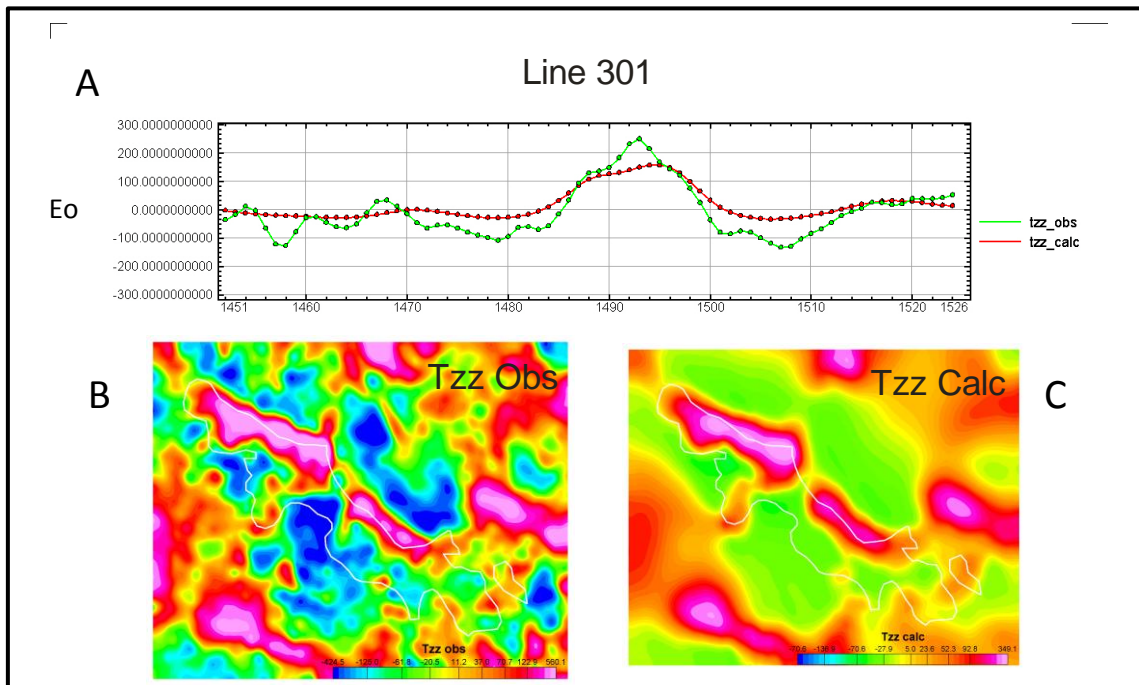
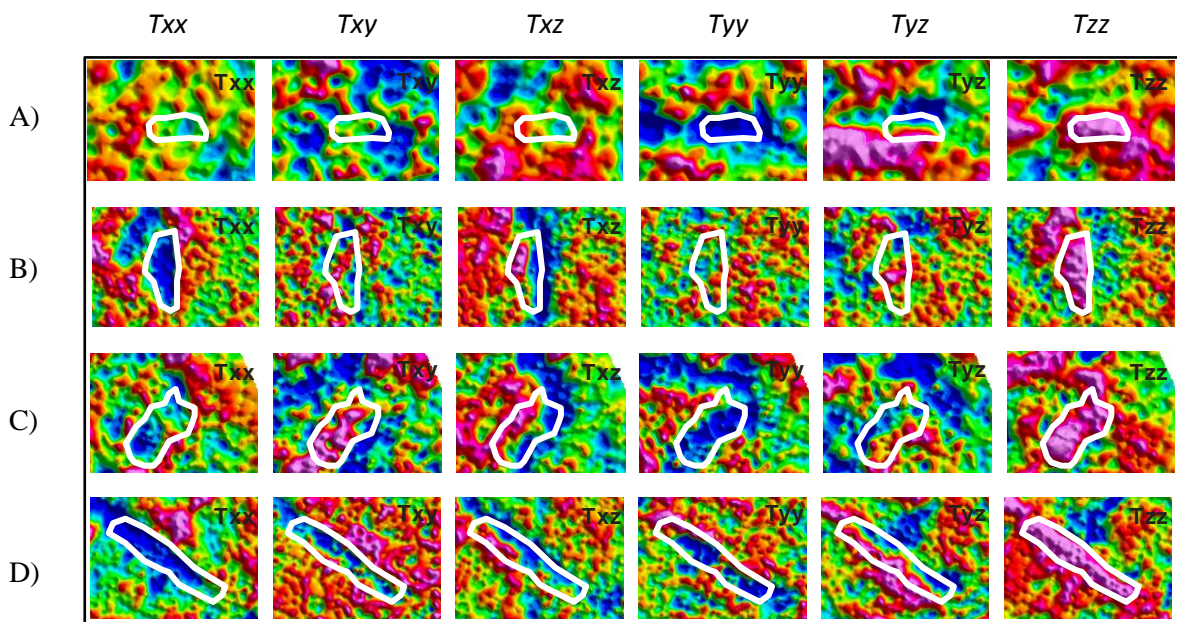


Figura 6-5: Soluções de controle de qualidade dos modelos de inversão a partir dos dados 3D-FTG. A) Perfis dos valores observados e calculados da componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ . Escala em Eotvos (Eo); B) Grid da componente  $T_{zz}$  observada; C) Grid da componente  $T_{zz}$  calculada.

Murphy (2004) a partir de observações e do modelo teórico representando a resposta de cada componente do gradiente da gravidade para um alvo ideal mostrou que a componente  $T_{zz}$  realça o corpo anômalo, enquanto que as demais componentes realçam as bordas do corpo anômalo, sendo que as componentes  $T_{xx}$  e  $T_{xz}$  realçam as bordas na direção N-S e as componentes  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$  realçam as bordas E-W. Através deste realce de

bordas os lineamentos estruturais podem ser realçados, indicando ser uma ferramenta útil para a análise estrutural. A magnitude das componentes  $T_{xx}$  e  $T_{yy}$  também pode ser utilizada para investigar a espessura dos alvos. Com estas considerações, foi analisado o realce de borda de cada componente do gradiente gravimétrico em relação a corpos de direção N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Figura 6-6) e assim poder traçar os lineamentos estruturais com maior confiança em relação ao seu posicionamento.



**Figura 6-6: Resposta de cada componente em relação à geometria do alvo, A) Alvo de direção E-W; B) Alvo de direção N-S; C) Alvo de direção NE-SW; D) Alvo de direção NW-SE.**

### Magnetometria

O aerolevanteamento magnetométrico foi realizado simultaneamente com o aerolevanteamento 3D-FTG, possuindo então as mesmas características do espaçamento entre linhas e altura do voo. O sistema aeromagnetométrico utilizado foi constituído por um sensor de bombeamento ótico de vapor de césio, modelo Scintrex CS-2, com sensibilidade de 0,001nT. A taxa de amostragem foi de 10Hz, gerando 1 medida a cada 7m, com leitura dos valores do campo magnético bruto e compensado.

Para realçar os dados observados foi realizada a interpolação através do algoritmo de mínima curvatura com tamanho de célula de 50m do campo magnético anômalo e



posteriormente aplicada uma transformação linear para gerar a amplitude do sinal analítico, calculada a partir da equação sugerida por Roest et al. (1992)

Através da utilização do espectro de potência, foi verificada a distribuição das profundidades das fontes anômalas, que indicou a profundidade de 250 metros como moda, o que é bastante coerente com o esperado para as formações ferríferas nesta área.

### **Gamaespectrometria**

O aerolevante gamaespectrométrico foi realizado segundo a direção N15E, com altura de voo de 150m em relação ao terreno e espaçamento entre as linhas de 250m, sendo que área foi coberta por duas etapas de aerolevante distintas, com a necessidade de utilizar segmentos de 113 linhas para cobrir o polígono deste trabalho. Foi utilizada uma aeronave Cessna – Grand Caravan equipada com gamaespectrômetro da EXPLORANIUM, modelo GR-280, de 256 canais, com intervalo entre as medições de 1Hz, ou seja, uma medida a cada 70m.

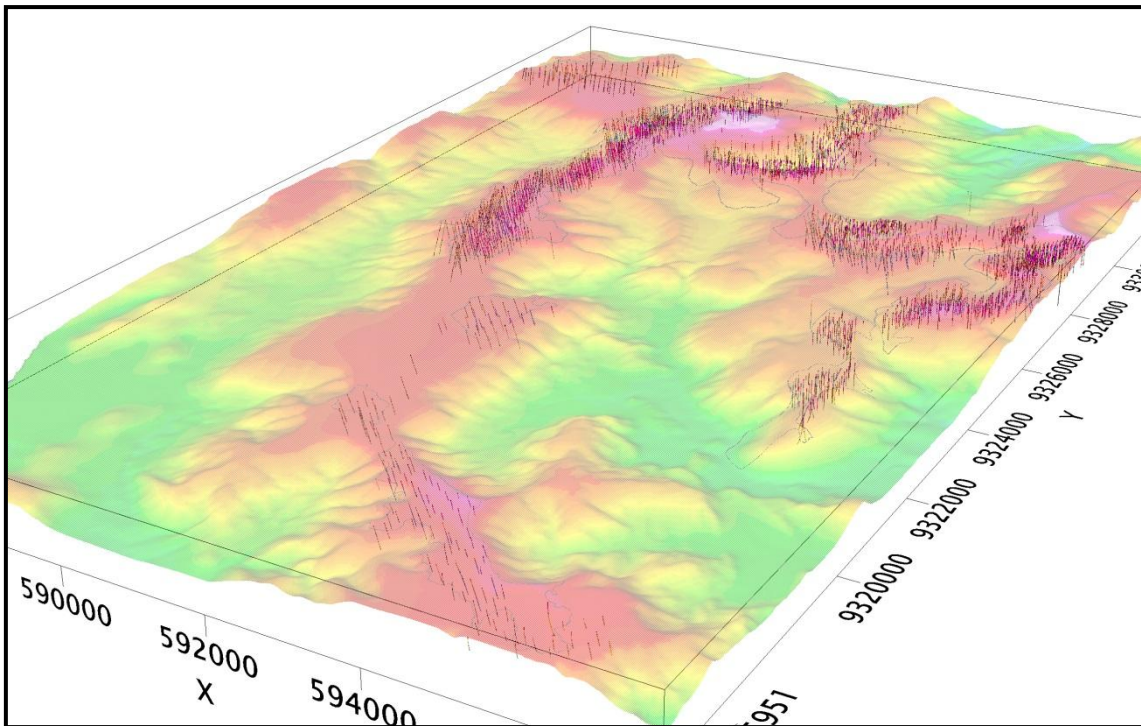
Para o realce dos dados foram os grids através da interpolação utilizando-se o algoritmo de mínima curvatura da contagem total (TC), dos radioelementos K, eTh e eU e das razões eTh/K, eU/eTh e eU/K, para realçar as coberturas lateríticas e colúvios de formações ferríferas (Boyle, 1982; Wildford et al., 1997; Zacchi et al., 2010), ainda foram geradas as imagens ternárias dos radioelementos e das razões entre os radioelementos. Outra técnica utilizada foi a determinação do fator F (Efimov, 1978), com o intuito de identificar zonas enriquecidas em K, em relação à razão eU/eTh, que podem estar relacionadas às zonas de alteração hidrotermal, como sugerido por Prichystal e Gnojeck (1985).

### **Amostras de densidades**

Como referências das densidades dos litotipos foram usadas amostras que foram coletadas ao longo dos anos e dão suporte às estimativas de recursos minerais dos projetos de minério de ferro em Serra Norte. Ao todo foram utilizados dados de 973 medidas de densidade.

## Dados de sondagem

Esta região de Serra Norte possui campanhas de sondagem que datam desde os anos 60, quando iniciaram os trabalhos de exploração mineral em Carajás. A base de dados conta com 2526 furos de sondagem rotativa diamantada (Figura 6-7), com os dados de localização (XYZ) no arquivo *Collar*, de desvio do furo no arquivo *Survey* e caracterização litológica visual e interpretada com os resultados de análises químicas no arquivo *Assay*.



**Figura 6-7:** Furos de sonda em Serra Norte, mostrando o traço em profundidade, em perspectiva com o modelo digital de elevação.

Os dados de sondagem foram processados para gerar o modelo de voxels tridimensional dos litotipos interceptados na sondagem (Figura 6-8 e Figura 6-9). Neste trabalho foi usada a metodologia de mínima curvatura para gerar os voxels com 25m de lado.

Através do modelo de voxels dos litotipos pretende-se estabelecer vínculos com os produtos de processamento dos dados aerogeofísicos como forma de validar as interpretações realizadas.

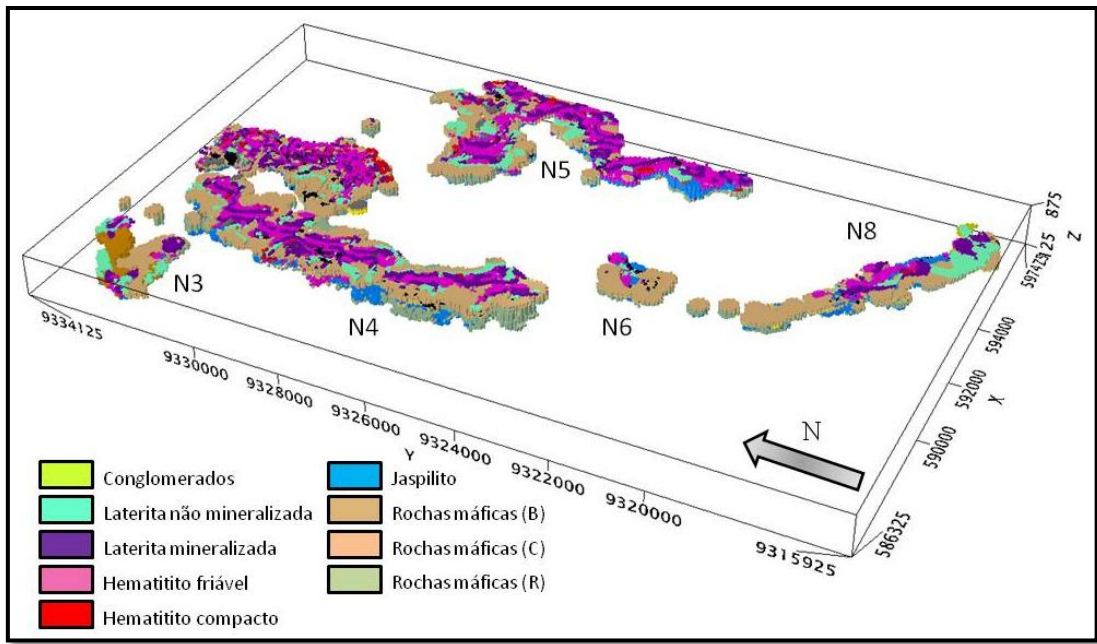


Figura 6-8: Modelo de voxels das litologias interceptadas nos furos de sonda em Serra Norte.

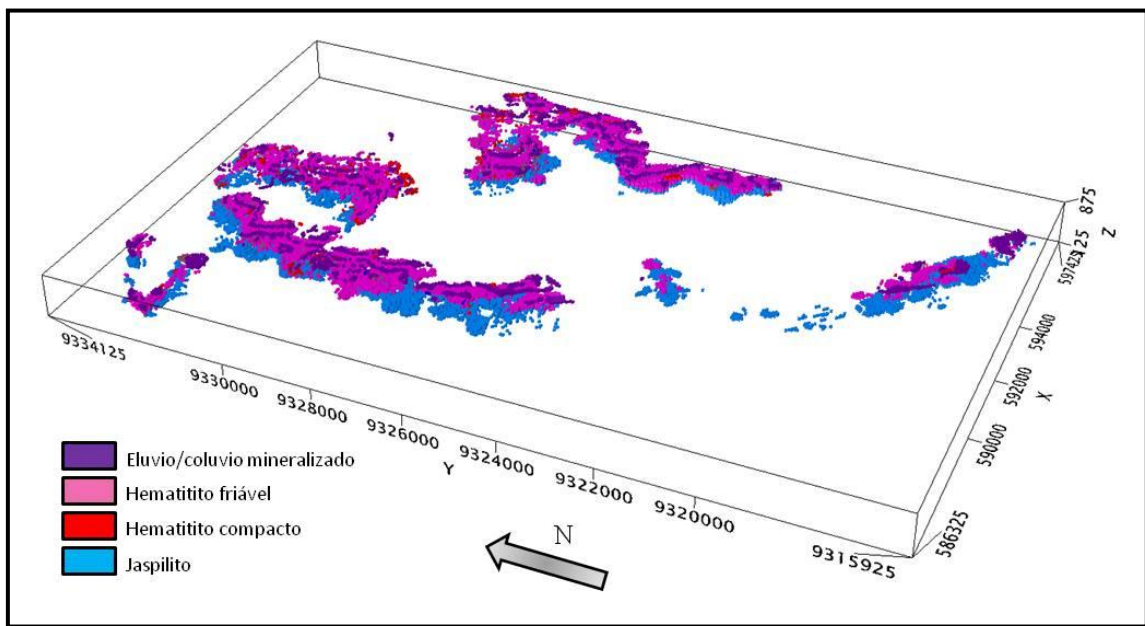


Figura 6-9: Modelo de voxels das formações ferríferas de Serra Norte.

## 6.5 Critérios para a definição de alvos e modelo exploratório integrado

Entre os maiores avanços atingidos nos últimos anos na exploração de minério de ferro está a utilização de técnicas geofísicas, que incluem a magnetometria, a gravimetria, os métodos elétricos e a radiometria. Originalmente, o principal método geofísico utilizado na exploração de minério de ferro foi a magnetometria, devido à presença de magnetita como um mineral de minério, o que caracterizava as anomalias magnéticas como um critério exploratório. Porém, o predomínio de hematita (não magnética) em diversos depósitos levou à necessidade da utilização de outros métodos geofísicos auxiliares na exploração, como por exemplo a aerogravimetria gradiométrica (Flis, 2008; Dalstra & Flis, 2008, Braga, 2009; Zacchi 2010).

No Brasil são registrados poucos trabalhos de exploração de minério de ferro utilizando dados geofísicos, sendo que normalmente as formações ferríferas constituem alvos secundários em modelos exploratórios elaborados para outros bens minerais. Destacam-se os trabalhos de Braga (2009) e Braga *et al.* (2009) que mostram uma correlação entre dados de aeromagnetometria e aerogravimetria gravimétrica 3D-FTG na prospecção do minério de ferro na área do Baú-Gandarela, Quadrilátero Ferrífero e o de Zacchi (2010) na região do Espinhaço Meridional que apresenta um modelo exploratório com dados derivados dos produtos geofísicos adquiridos com o sistema *Spectrem*.

A partir dos produtos de processamento e realce dos dados dos aerolevantamentos geofísicos (3D-FTG, magnetometria e gamaespectrometria) efetuou-se uma análise dos principais indicadores para a definição dos alvos para minério de ferro e dos realces de dados mais indicados. Neste processo foram utilizadas bases de dados dos mapeamentos geológicos existentes, base de dados das diversas campanhas de sondagem e dados de caminhamentos de campo, com o intuito de validar as análises e interpretações realizadas. Nas áreas de mineração foi utilizada uma máscara para que a intensa movimentação de massas e completa descaracterização do terreno original não interferissem nas análises e interpretações.



Na elaboração de um modelo exploratório baseado em dados aerogeofísicos e sua integração com dados multifonte, a abordagem utilizada deve consistir no processamento e realce dos dados, com ênfase no contexto geológico, uma vez que em modelos exploratórios não se deve observar apenas as anomalias geofísicas, mas também as respostas relacionadas à mineralização, à litologia e às estruturas que podem possuir importância econômica. Por outro lado, métodos clássicos como interpretação de mapas bidimensionais não responde a todos os questionamentos e na seleção de alvos potenciais. A melhor forma de se otimizar é complementar todo o arcabouço gerado através da aplicação de inversões geofísicas e integração tridimensional dos dados. Para a melhor compreensão e correlação geofísico-geológica, os litotipos principais mapeados dentro do banco de dados da sondagem, bem como os dados oriundos de trabalhos de campo foram agrupados de acordo com os critérios utilizados no processo de modelagem geológica para as estimativas de recursos, cedidos pela Vale S.A que atua na área de estudo em Serra Norte (Tabela 6-1).

**Tabela 6-1: Litotipos mais comuns em Serra Norte e suas principais características**

Litotipo	Descrição	Nomenclatura usual	Sigla
Cobertura laterítica estéril	Ocupa o topo dos platôs marcando o antigo horizonte de aplainamento da província de Carajás, cobrindo o regolito das rochas máficas ou está associada a depósitos coluvionares maduros e cimentados. Possui estrutura coliforme e elevada porosidade	Canga Química	CQ
Cobertura laterítica mineralizada	Depósito coluvionar e/ou eluvionar sobre os afloramentos de minério <i>in situ</i> . A espessura pode chegar a mais de 20m. Possui elevado teor em Fe e contaminantes relativamente baixos, permitindo seu potencial aproveitamento como minério. É um indicador das ocorrências de minério de ferro	Canga de Minério	CM
Hematítico Friável	Tipologia de minério de ferro francamente friável, com alta porosidade, e com teor médio de 66% de Fe. Coloração preta a cinza escuro, algumas vezes avermelhada devido a alteração para goethita. O bandamento herdado do jaspilito é parcialmente a totalmente obliterado devido a lixiviação dos níveis de jaspe/calcedônia/carbonato	Hematita Friável	HF
Hematítico Compacto	Tipologia de minério compacta, gerada a partir da cimentação por goethita quando associada a processos de lateritização e localmente por fluidos hidrotermais, quando associada a estruturas tectônicas. Possui coloração variando da preta a marrom avermelhada. A porosidade é elevada e os teores de Fe concentram-se entre 60,15 e 68,09%	Hematita Compacta	HC
Hematítico Manganêsífero	Tipologia de minério rica em Fe e com teores de Mn superiores a 2%, usualmente posicionada na base dos corpos de hematítico, provável zona de acumulação de Mn lixiviado do horizonte intemperizado	Hematita Manganêsífera	HMN
Hematítico Aluminoso	Tipologia de minério com teores de ferro superiores a 55% e alumina superior a 3%, normalmente presente no topo da formação ferrífera	Hematita Aluminosa	HAL
Ferro Manganês	Jaspilito parcialmente intemperizado enriquecido em manganês	Ferro Manganês	FMN
Jaspilito	Formação ferrífera bandada (BIF) compacta, com laminações centimétricas a milimétricas entre níveis de jaspe/calcedônia/carbonato e magnetita/martita de granulação muito fina. Representa o protominério na região, com teores de Fe entre 20 a 40%.	Jaspilito	JP
Regolito muito intemperizado	Regolito das rochas máficas, com total perda da estrutura original do protólito. Sua profundidade se relaciona diretamente ao nível de intemperismo	Máfica Decomposta	MD
Regolito parcialmente intemperizado	Regolito das rochas máficas apresentando relictos da trama original do protólito, porém já com profunda transformação mineralógica	Máfica semi-decomposta	MSD
Rochas Máficas	Basaltos, gabros e diabásios pouco a nada afetados pelo intemperismo, sistematicamente cloritizados. Apresenta coloração verde escura, por vezes com estruturas vulcânicas típicas como amígdalas preenchidas por quartzo, carbonatos e cloritas e eventualmente por sulfetos.	Máfica Sã	MS
Arenito	Rocha sedimentar maciça de coloração esbranquiçada, constituídas principalmente por grãos de quartzo e matriz arcoseana	Arenito	AET
Conglomerado	Rocha sedimentar clástica de caráter psamítica, possui coloração esbranquiçada a amarelada, constituída principalmente por fragmentos angulosos a sub-arredondados de quartzitos, jaspilito, cherts e rocha vulcânica máficas	Conglomerado	CGL
Pelitos/Siltitos	Rocha sedimentar de granulometria fina, constituída por camadas de silte e ou argila, apresentando-se localmente mosqueados	Pelito / Siltito	AGT

### 6.5.1 Gamaespectrometria

A interpretação qualitativa conjunta de todas as imagens gamaespectrométricas geradas para o projeto foi efetuada em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando-se o ArcGis 10.1 (ESRI, 2012).

A análise dos teores de K, eU e eTh dos corpos mapeados foi baseada na análise das respostas dos canais individuais, nas composições em falsa cor RGB e CMY, bem como nestas composições combinadas com o modelo digital de terreno gerado a partir dos dados aerogeofísicos e do LIDAR.

Nos canais individuais, o teor de K, eU, eTh foi analisado com base na imagem em falsa cor. Os procedimentos adotados para a interpretação dos dados gamaespectrométricos podem ser assim sumarizados: (i) comparação da imagem correspondente a cada canal discriminado (K, eU, eTh) com a topografia, para estudar a influência do relevo sobre estes dados; (ii) análise do canal de contagem total para a definição de grandes domínios gamaespectrométricos, bem como a análise da contribuição relativa de cada um dos outros canais; (iii) uso de composições em falsa cor (imagem ternária) do tipo RBG e CMY, com os canais de K, eTh e eU, adicionando, ou não, o modelo digital de terreno como uma quarta componente e seu estudo espacial para definir unidades e/ou domínios com assinaturas gamaespectrométricas semelhantes. A este acervo foi acrescentada a imagem do parâmetro F (Efimov 1978). A técnica do parâmetro F (Efimov 1978) compreende uma tentativa de distinção de enriquecimento hidrotermal de K em relação à informação de *background* geológico, ou seja, as variações litológicas do meio. Este parâmetro consiste na relação de abundância de K associada à razão eTh/U e da abundância de eU relacionada à razão eTh/K.

Normalmente na prospecção de minério de ferro, os dados gamaespectrométricos são mais utilizados para o mapeamento de unidades geológicas associadas com as formações ferríferas do que diretamente para a determinação da sua ocorrência (Flis, 2008). Isso é devido à baixa concentração natural desses elementos nas formações ferríferas. No Brasil, os baixos valores de radioelementos tendem a se destacar, bem como a associação com os platôs lateríticos.

Na área de estudo, a análise dos produtos derivados dos dados gamaespectrométricos permitiu individualizar assinaturas associadas com as formações ferríferas aflorantes, associadas à Formação Carajás, através dos baixos teores dos radioelementos K, eTh e eU e que mostram uma alta correlação com os afloramentos mapeados por Resende e Barbosa (1972). A assinatura do regolito associada com essa unidade mostram platôs enriquecidos em eTh. No entanto, as coberturas lateríticas associadas às rochas máficas, encaixantes da mineralização associadas às Formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, são enriquecidas eTh e eU. Rochas sedimentares clásticas, tais como arenitos e conglomerados de matriz arcoseana e que recobrem o Grupo Grão Pará, são mapeadas com altos teores de K e foram correlacionadas com as unidades da Formação Gorotire e Águas Claras (Figura 6-10)



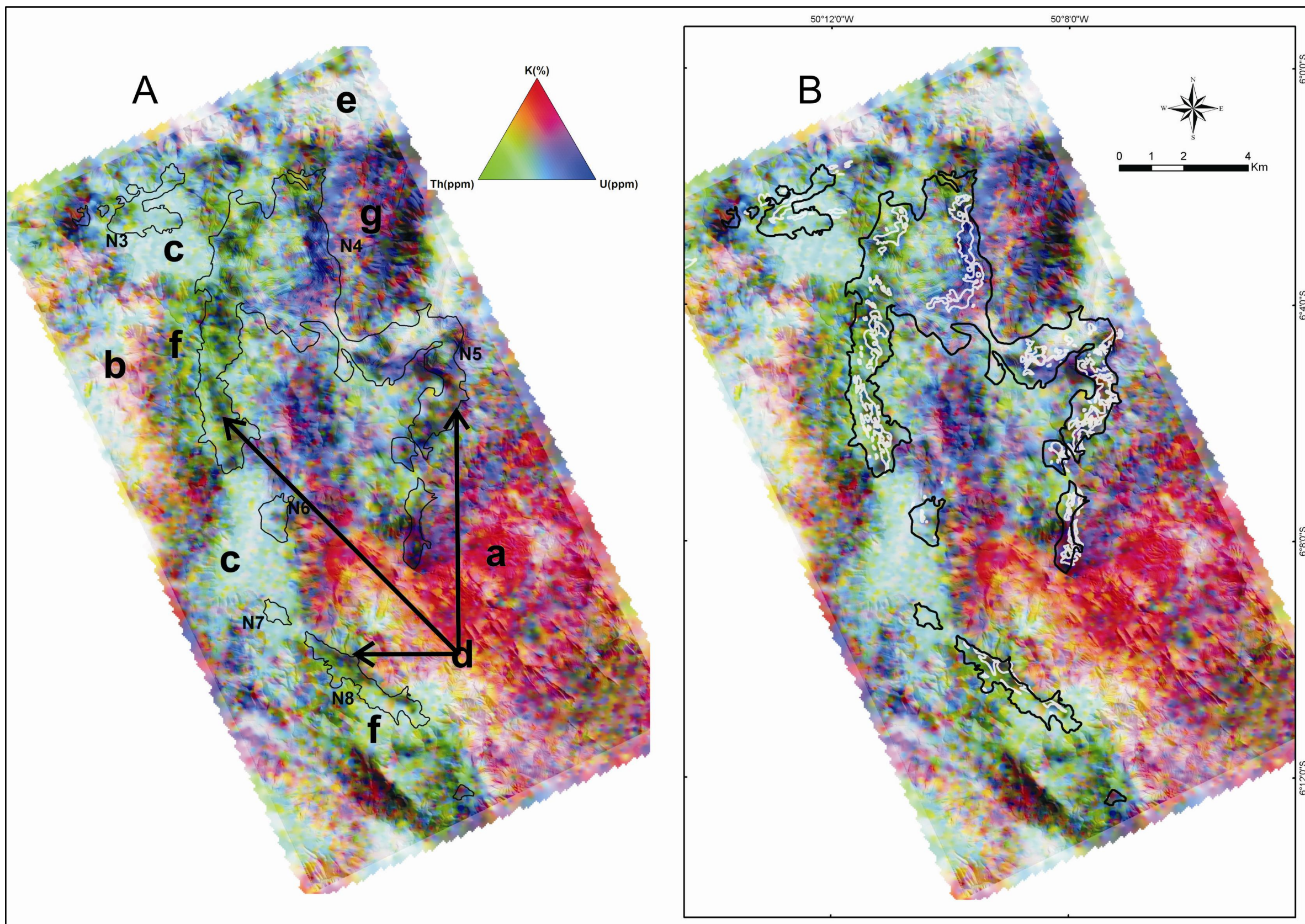


Figura 6-10: A) Composição colorida RGB dos radioelementos K, eTh e eU, mostrando em: a) Conglomerados da Formação Gorotire; b) Arenitos da Formação Águas Claras; c) Coberturas lateríticas estéreis sobre rochas máficas; d) Afloramentos de formações ferríferas e lateritas mineralizadas e) Granito Serra dos Carajás; f) Rochas Máficas da Formação Igarapé Cigarra; g) Rochas máficas da Formação Parauapebas; B) Os polígonos em branco mostram os afloramentos de formações ferríferas mapeados por Resende e Barbosa (1972) sobre o composição colorida RGB (KThU).



A contagem Total também realça as formações ferríferas aflorantes, sendo que estão relacionadas às baixas contagens nos platôs enquanto que as coberturas lateríticas sobre os platôs são concordantes com as altas contagens. As áreas com alto K são correlacionadas às rochas sedimentares com matriz arcoseana, como ocorre com os conglomerados e arenitos da Formação Gorotire. As anomalias indicadas pelo fator-F e os altos valores de eU são concordantes com o alinhamento de direção NE-SW que corta a porção central, podendo estar relacionados aos condutos de fluidos hidrotermais e ser a justificativa para a alteração potássica observada em gabros de N5.

### 6.5.2 Magnetometria

A análise do relevo referente ao campo magnético anômalo foi auxiliada por suas transformações lineares, principalmente: (i) amplitude do sinal analítico, demarcando a posição das fontes magnéticas; (ii) amplitude do gradiente horizontal total; (iii) primeira derivada vertical. A utilização das derivadas, principalmente as verticais, ajudou na compreensão das posições espaciais relativas das fontes, enquanto as horizontais ajudaram na demarcação em mapa das mesmas. Foram feitas a correlação e a integração com a geologia local disponível na literatura utilizando mapas geológicos na escala 1:20.000.

A avaliação de dados aeromagnetométricos permitiu a identificação de feições magnéticas e estruturas interessantes sob o ponto de vista prospectivo. Observa-se que os corpos mineralizados com alto teor em Fe não são mapeados ou apresentam baixo gradiente na amplitude do sinal analítico, por serem ricos em hematitas e martitas e pobres em magnetita. Através da análise dos produtos derivados dos dados magnéticos, principalmente na amplitude do sinal analítico de ordem zero, foi verificada a correlação entre as formações ferríferas em superfície e subsuperfície com as anomalias observadas, devido à presença de magnetita e martita na paragênese mineral presente nas formações ferríferas (Figura 6-11 e Figura 6-12).

A validação efetuada a partir dos dados geológicos de furos de sondagem e modelo de *voxels* gerado a partir dos litotipos interceptados na sondagem confirma essa premissa e mostra que o magnetismo está mais associada ao protominério. Localmente pode-se

observar a perda do magnetismo em função da oxidação presente no minério de ferro (Macambira, 2003) (Figura 6-12)

A seleção de áreas favoráveis para prospecção de minério de ferro baseada na comparação entre os dados do aerolevante magnetométrico e 3D-FTG (Figura 6-13) mostra que as feições interpretadas a partir dos produtos derivados da gravimetria gradiométrica são mais precisas e realçam a envoltória das anomalias potenciais, bem como a compartimentação estrutural.

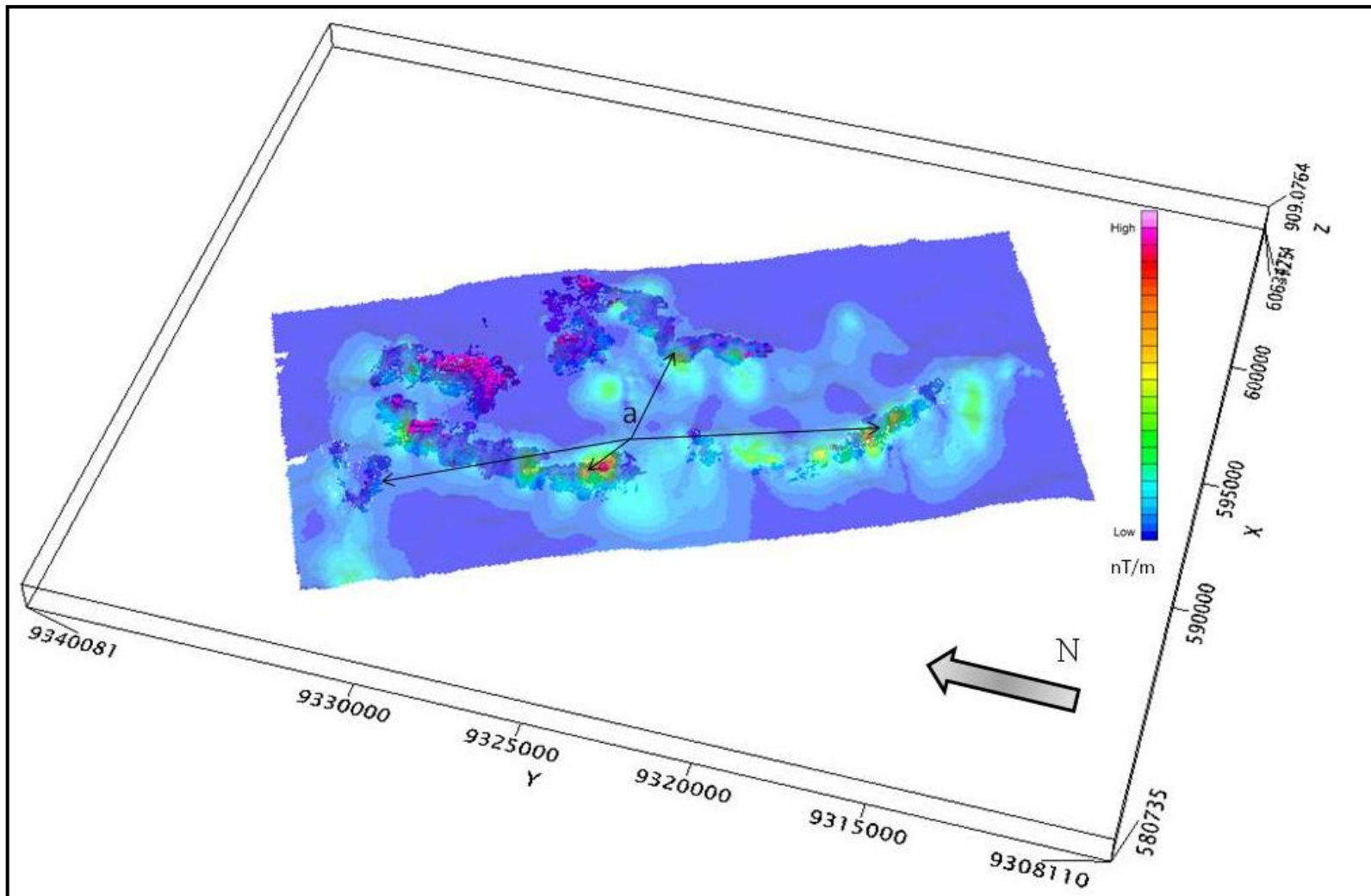


Figura 6-11: Amplitude do sinal analítico, com contraste linear de cores sobre o modelo de voxels (a) das formações ferríferas caracterizadas em testemunhos de sondagem.



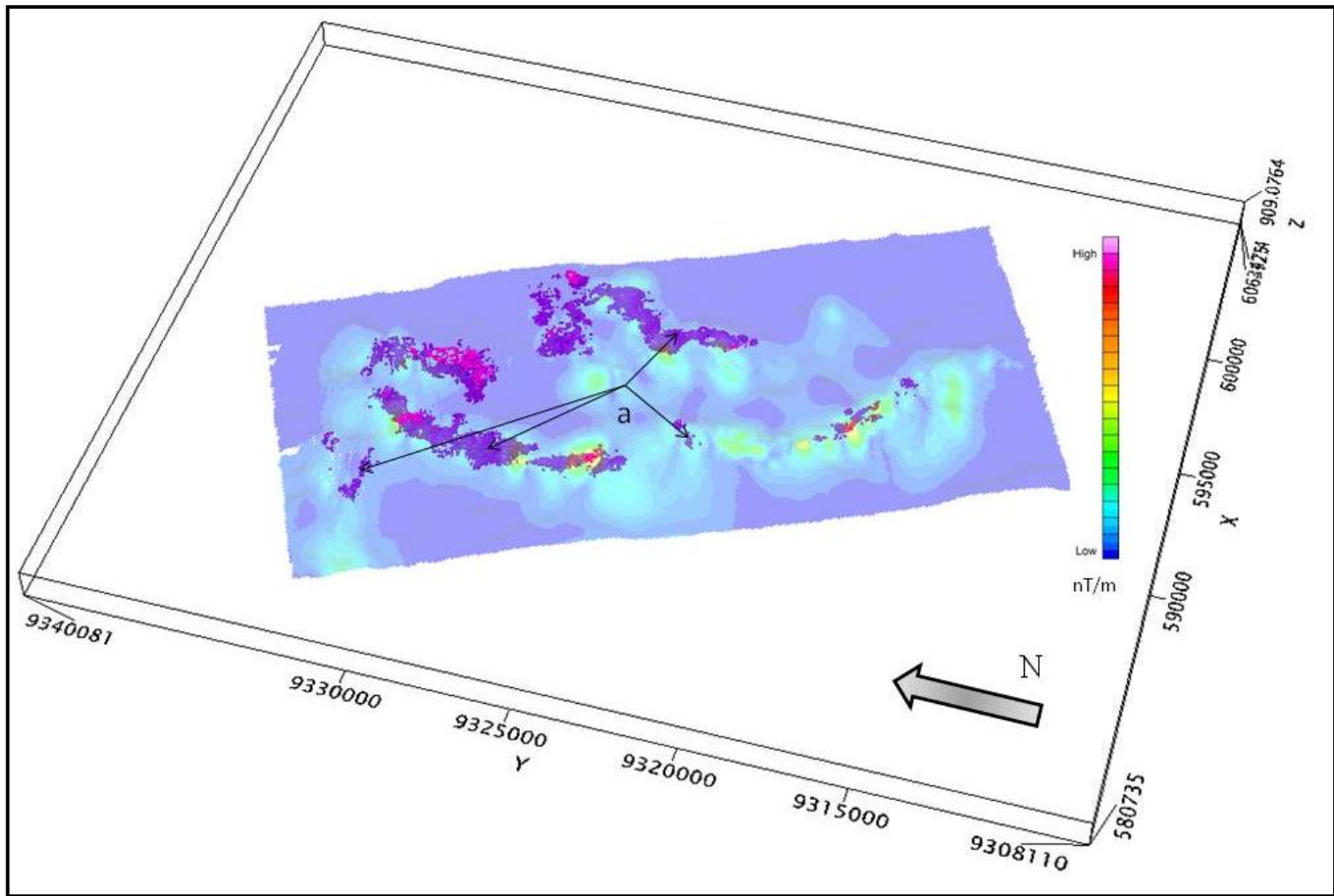


Figura 6-12: Amplitude do sinal analítico de ordem zero, mostrando em (a) ocorrências de hematititos friáveis deslocados em relação aos altos gradientes magnetométricos.

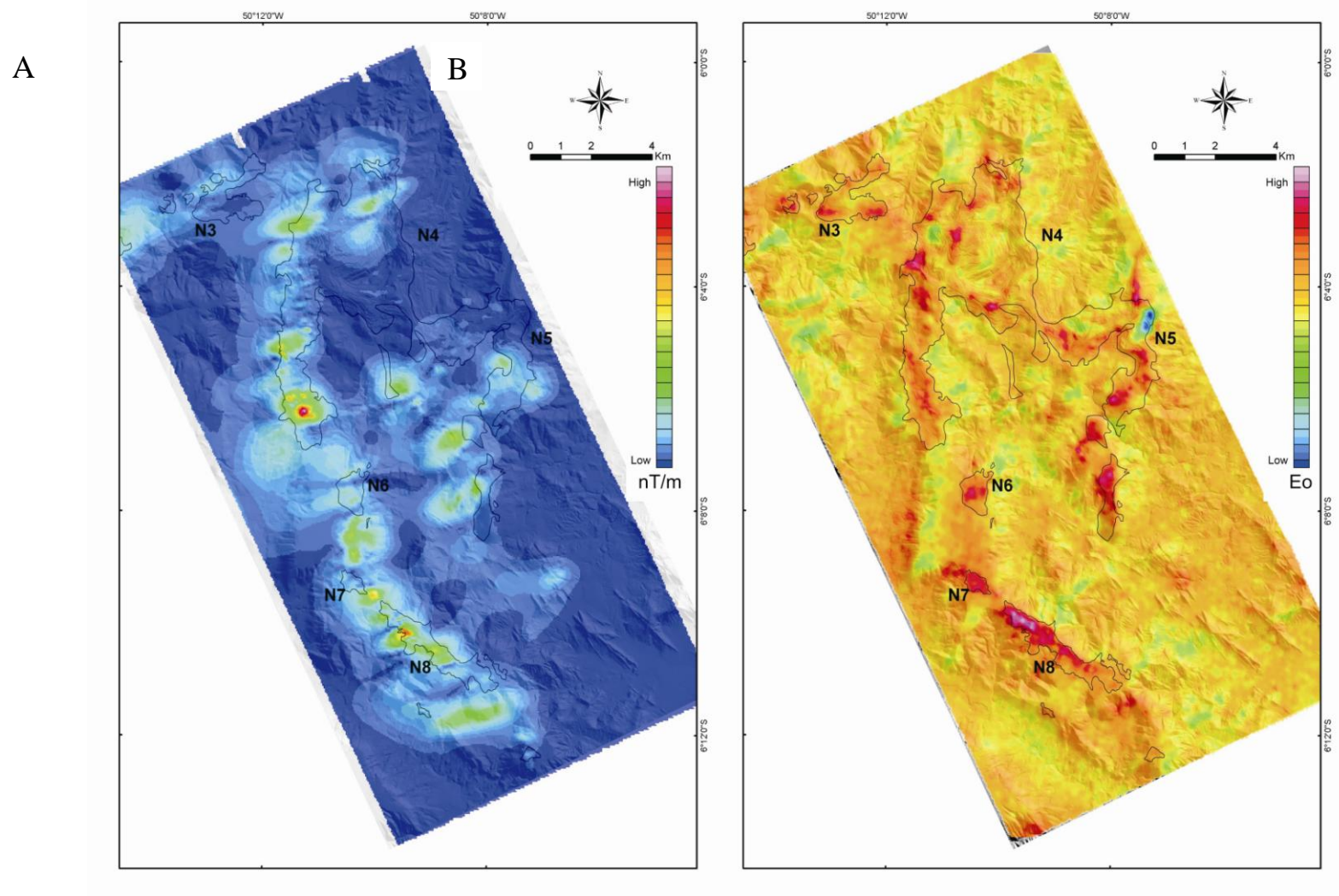
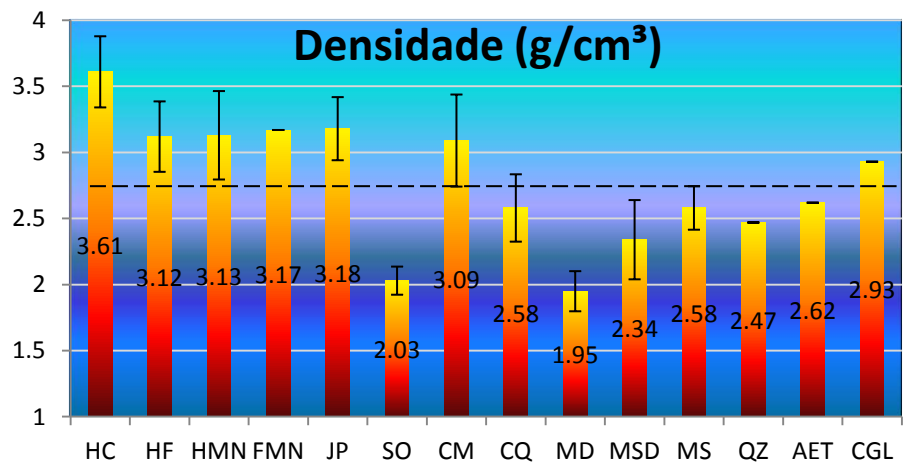


Figura 6-13: A) Imagem da amplitude do sinal analítico de ordem zero B) Imagem da componente do gradiente gravimétrico  $T_{zz}$ .

### 6.5.3 Caracterização do minério de ferro através da análise de mapas bidimensionais, inversão e integração tridimensional dos dados derivados do levantamento aerogravimétrico gradiométrico 3D-FTG

Para que haja a diferenciação entre os litotipos constituintes do substrato rochoso utilizando dados de aerogravimetria gradiométrica, é necessário que haja contrastes de densidades que possam ser discretizados. Com esta premissa e com o conhecimento prévio das densidades dos principais litotipos existentes na área deste trabalho verificou-se que as densidades das formações ferríferas possuem claro contraste com as encaixantes, como pode ser observado na Figura 6-14, conferindo à componente Tzz alta correlação entre os dados observados no aerolevantamento com os coletados em campo e em testemunhos de sondagem das campanhas de sondagem realizadas desde a década de 60 (Figura 6-15).



**Figura 6-14:** Dados de densidade para Serra Norte coletados em testemunhos de sondagem e frentes de lavra, mostrando o contraste entre as formações ferríferas e suas encaixantes.

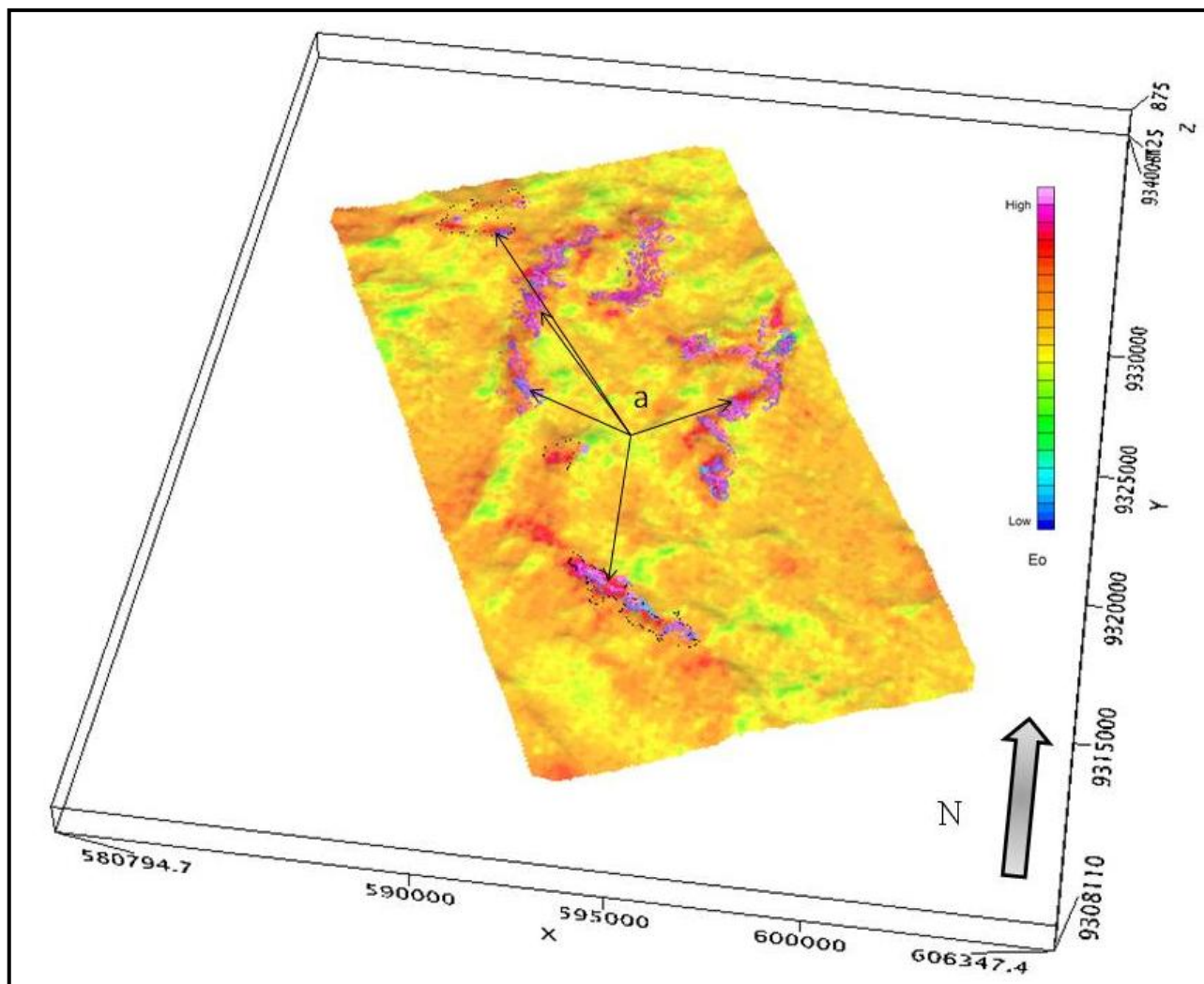
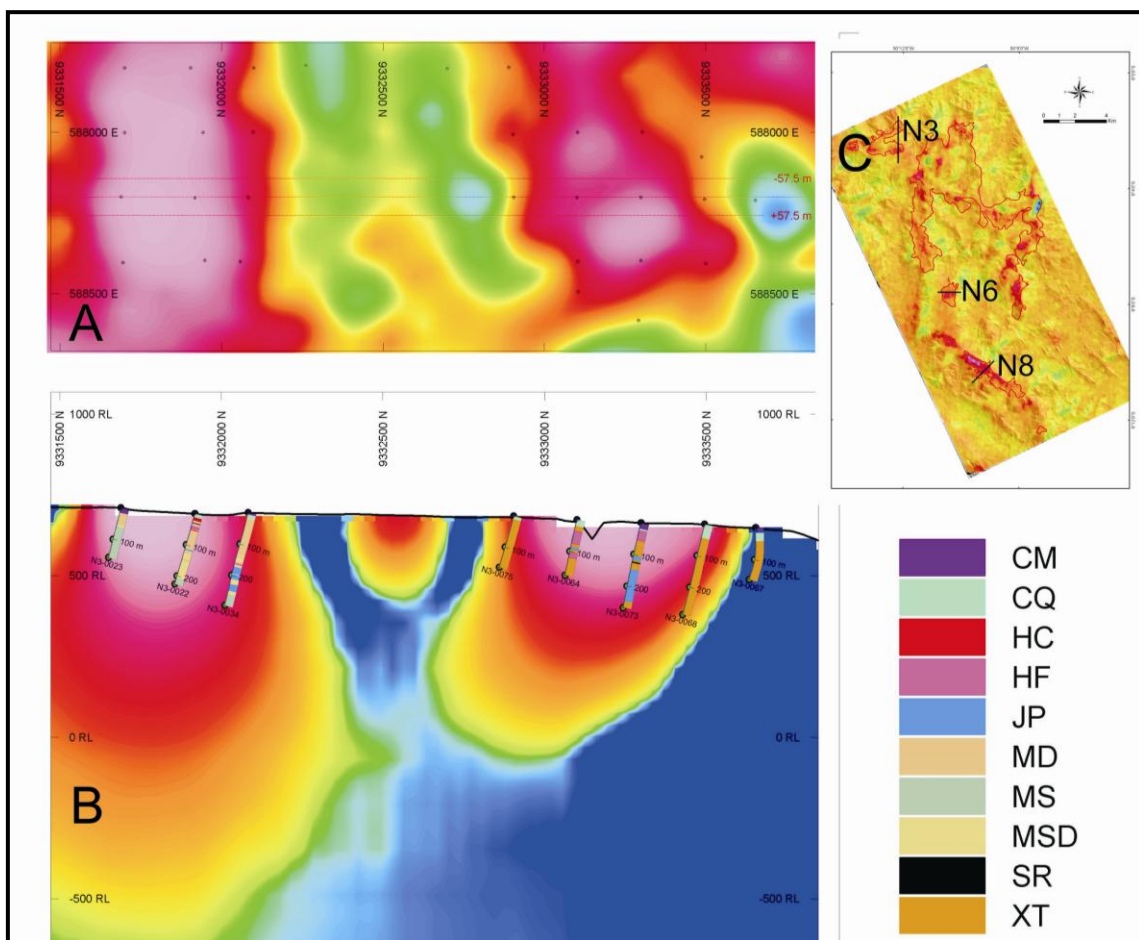


Figura 6-15: Grid da componente  $T_{zz}$ , com contraste de cor linear, sobreposto ao modelo de voxels das interseções de formações ferríferas, mostrando em (a) a correlação com os altos gradientes.



As seções verticais elaboradas a partir dos dados geológicos dos furos de sonda realçam a envoltória dos altos gradientes gravimétricos mapeadas na componente  $T_{zz}$ . Observa-se que os altos gradientes correspondem às regiões onde ocorrem as formações ferríferas, minérios e protominérios (jaspilitos), o que confere a alta correlação entre eles. Esta observação deve-se ao fato dos altos valores do gradiente gravimétrico estarem relacionadas ao minério e protominério de ferro que possuem claro contraste de densidade com as encaixantes e são aflorantes a subaflorantes, com profundidades variando da superfície do terreno a até cerca de 400m de profundidade (Figura 6-16, Figura 6-17 e Figura 6-18).



**Figura 6-16:** A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N3, mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e protominério); C) Localização da seção vertical em N3, sobre o grid do  $T_{zz}$ .

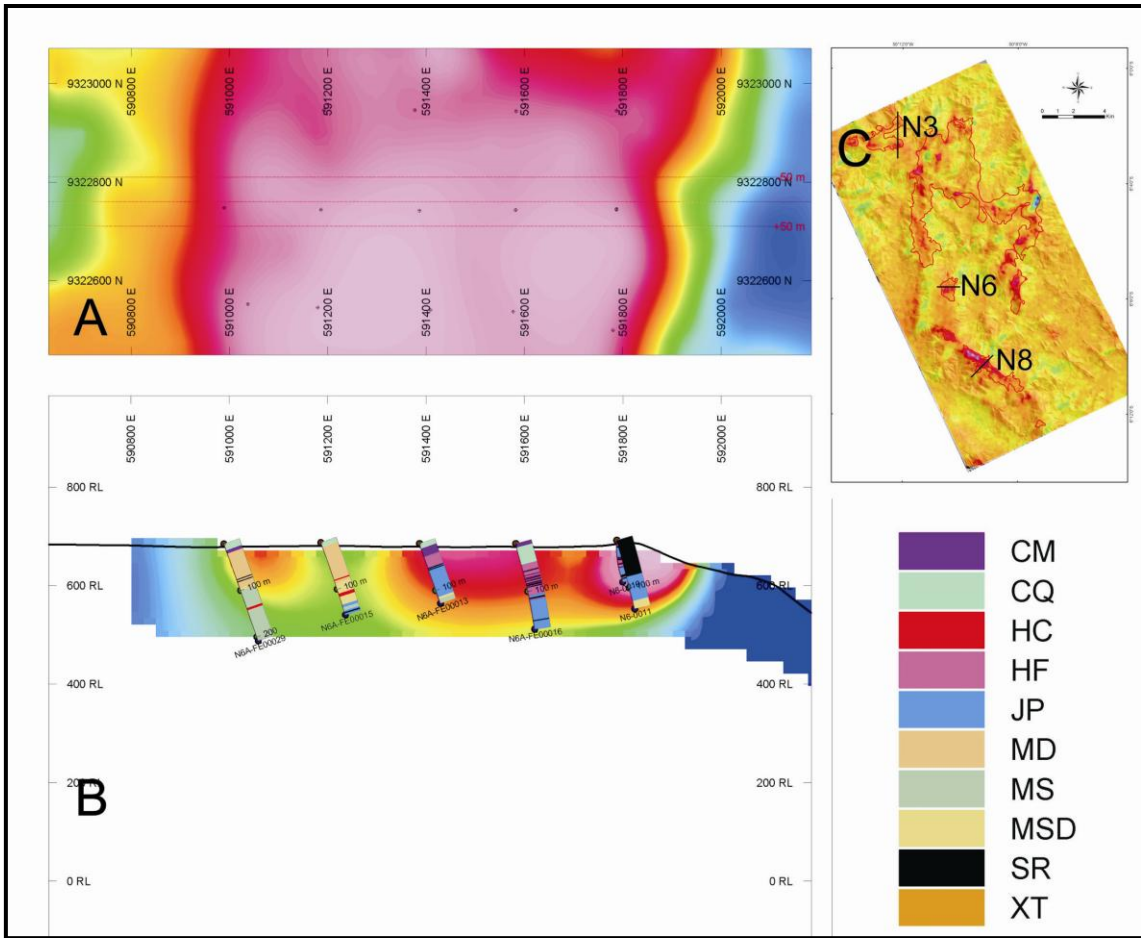
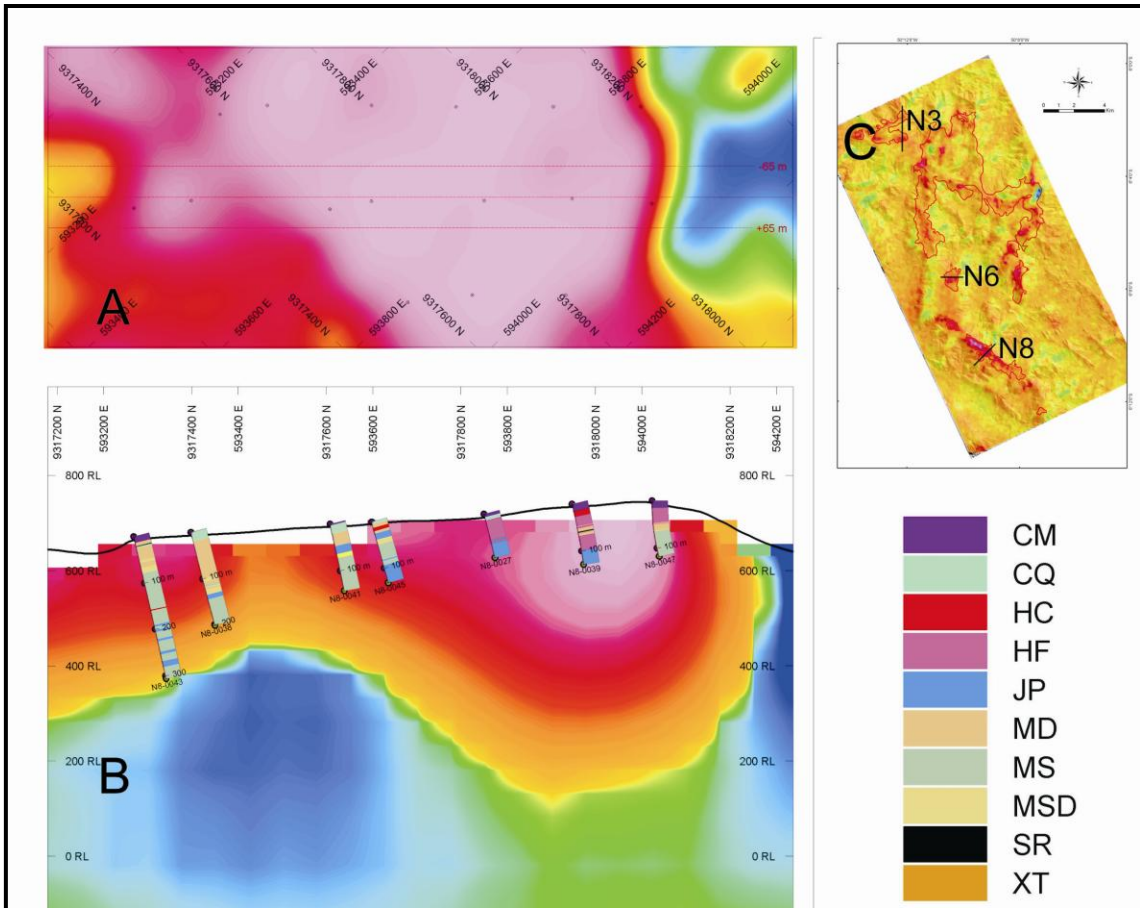


Figura 6-17: A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N6, mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e protominério); C) Localização da seção vertical em N6, sobre o grid do  $T_{zz}$ .



**Figura 6-18:** A) Grid da componente  $T_{zz}$  com o traço da seção vertical; B) Seção vertical em N8, mostrando a correlação entre a envoltória dos altos gradientes gravimétricos, originadas a partir da inversão dos dados 3D-FTG e as interseções com as formações ferríferas (minério e protominério); C) Localização da seção vertical em N8, sobre o grid do  $T_{zz}$ .

Produtos gerados a partir do cálculo do invariante ( $InvarT_{xz}T_{yz}$  e  $InvarT_{xy}T_{xx}T_{yy}$ ), o produto dos gradientes  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{zz}$  e a visualização dos gradientes utilizando o sistema RGB ( $T_{zz}T_{yy}T_{xx}$ ) mostram o realce dos altos gradientes que mapeiam os afloramentos e porções mais rasas da formação ferrífera. Esses produtos se revelaram úteis no mapeamento e na priorização de alvos para as etapas de verificação em campo. Na Figura 6-19 pode-se observar o  $InvarT_{xz}T_{yz}$  sobreposto a um grid tridimensional das formações ferríferas gerado a partir dos furos de sonda.

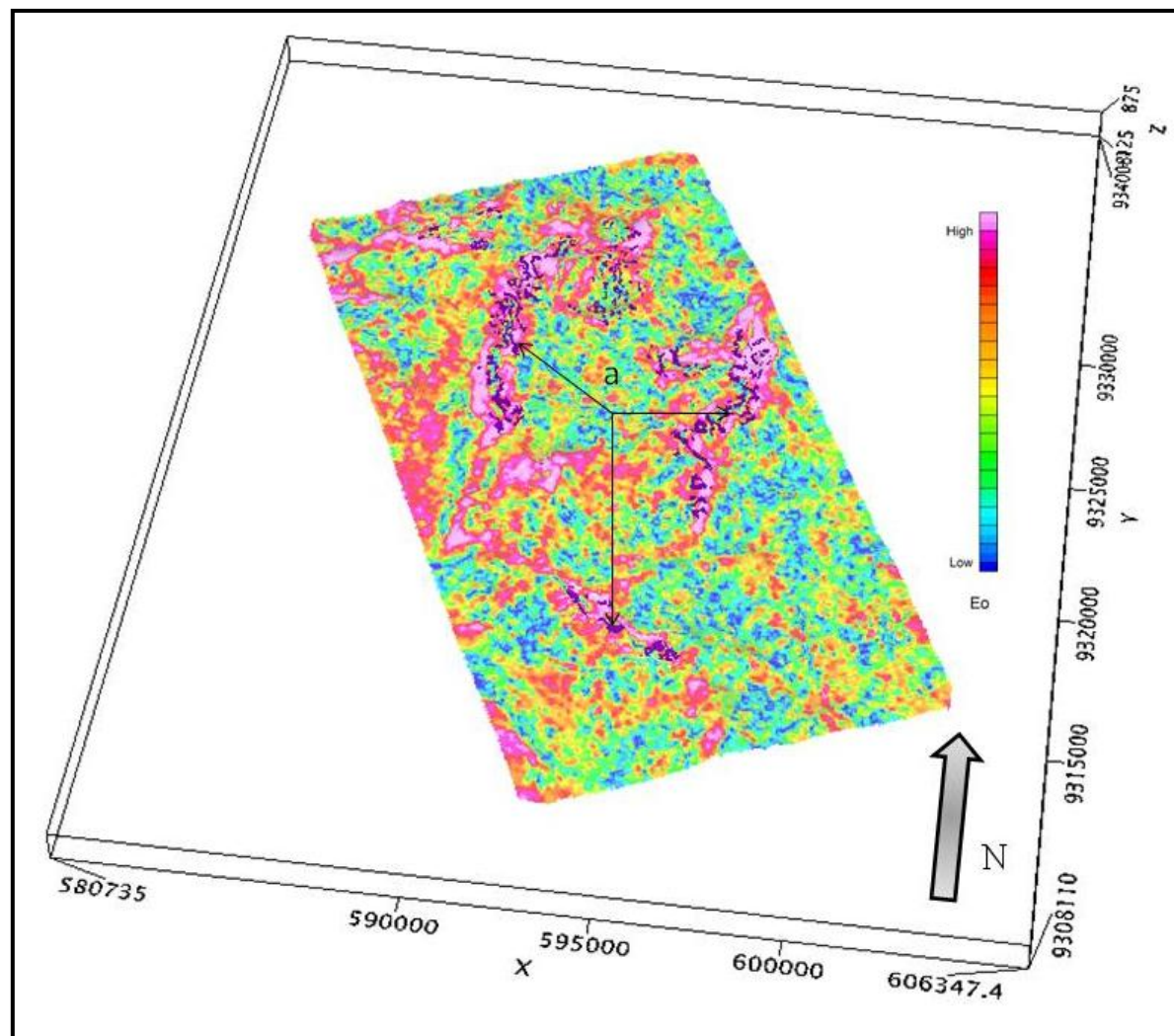


Figura 6-19: Grid do invariante Invar  $T_{xz}T_{yz}$  mostrando em (a) os baixos gradientes correlacionados com a cobertura laterítica mineralizada (CM).



Utilizando as componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$  do gradiente gravimétrico, interpretou-se o arcabouço estrutural da área de estudo, uma vez que estas componentes, como demonstrado na Figura 6-6: Resposta de cada componente em relação à geometria do alvo, A) Alvo de direção E-W; B) Alvo de direção N-S; C) Alvo de direção NE-SW; D) Alvo de direção NW-SE., realçam os limites dos contrastes de densidade que estão relacionados às discontinuidades geológicas existentes. Através de dados estruturais coletados em campo e dos mapeamentos geológicos existentes (Figura 6-20) pode-se validar a interpretação realizada. De forma geral, existem três famílias de estruturas que puderam ser discriminadas (Figura 6-21), sendo a primeira de traço E-W, chamada de  $S_n$  que é paralela à superfície do bandamento ( $S_b$ ), a segunda de traço NW-SE aqui denominada de  $S_{n+1}$  e a terceira de traço NE-SW denominada de  $S_{n+2}$ . Os critérios de corte e superposição observados nas imagens foram hierarquizados com dados estruturais coletados em campo (Figura 6-22).

A foliação  $S_{n+1}$  é mapeada em afloramentos como zonas de cisalhamento de largura métrica transpondo a  $S_n$ , enquanto que a  $S_{n+2}$  nas formações ferríferas apresenta-se como uma clivagem espaçada. Nas encaixantes, a  $S_{n+2}$  são mapeadas como zonas de cisalhamento métricas a decamétricas. Estas duas estruturas apresentam componentes direcionais e verticais que são responsáveis pelas diferenças de nível e inter-digitação entre os contatos dos litotipos e normalmente possuem alto ângulo de mergulho, o que é característico deste tipo de estrutura. Tanto os mapas geológicos de Resende e Barbosa (1972) como o de Macambira (2003) caracterizaram estas estruturas, sendo que o primeiro focou nos topos dos platôs e o segundo nas encaixantes das formações ferríferas, ficando restrito à porção N da área deste estudo.

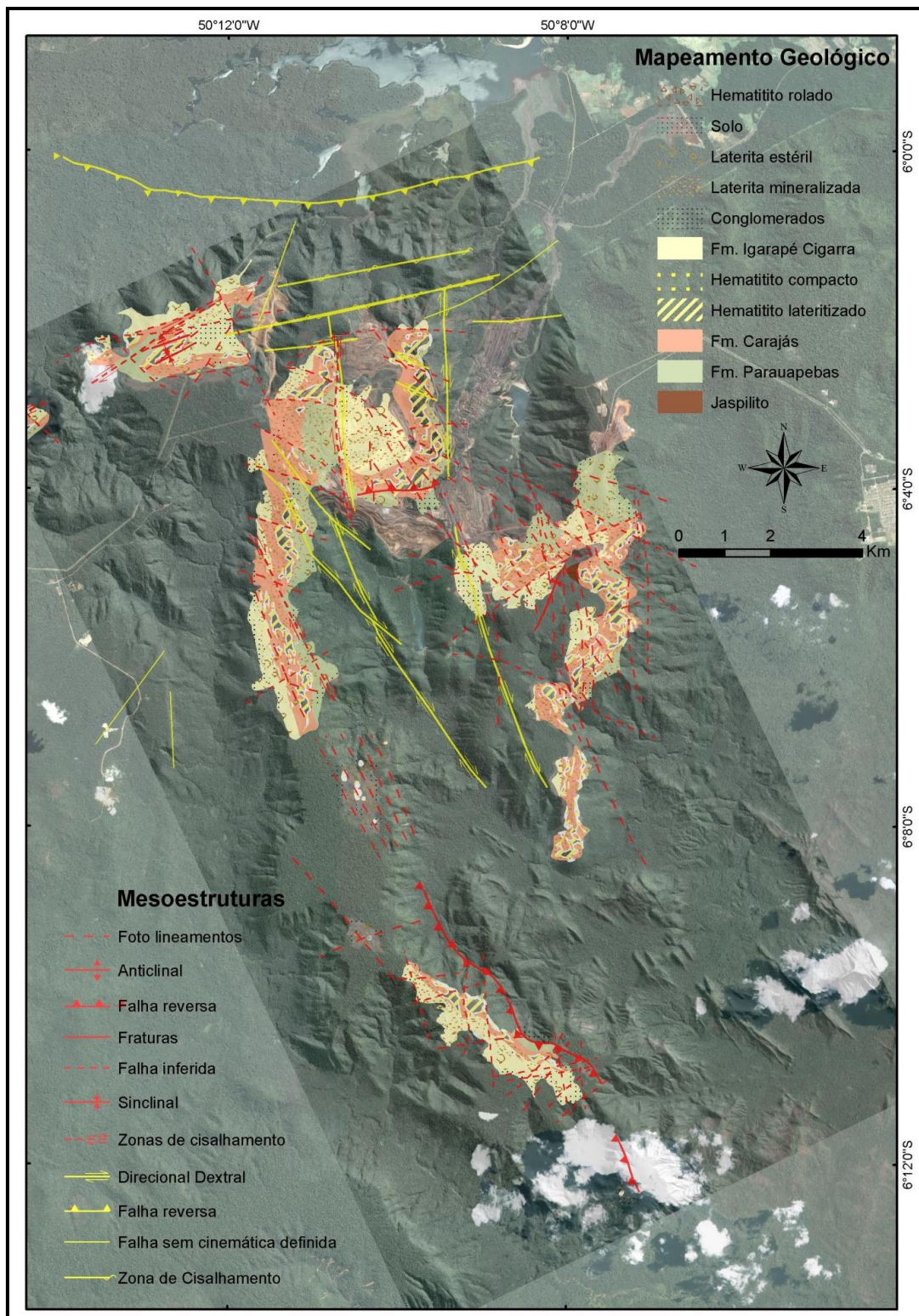


Figura 6-20: Mapa geológico com mesoestruturas interpretadas por Resende e Barbosa (1972) em vermelho e na porção N por Macambira (2003) em amarelo. Fundo formado por imagens Ikonos de 2007.



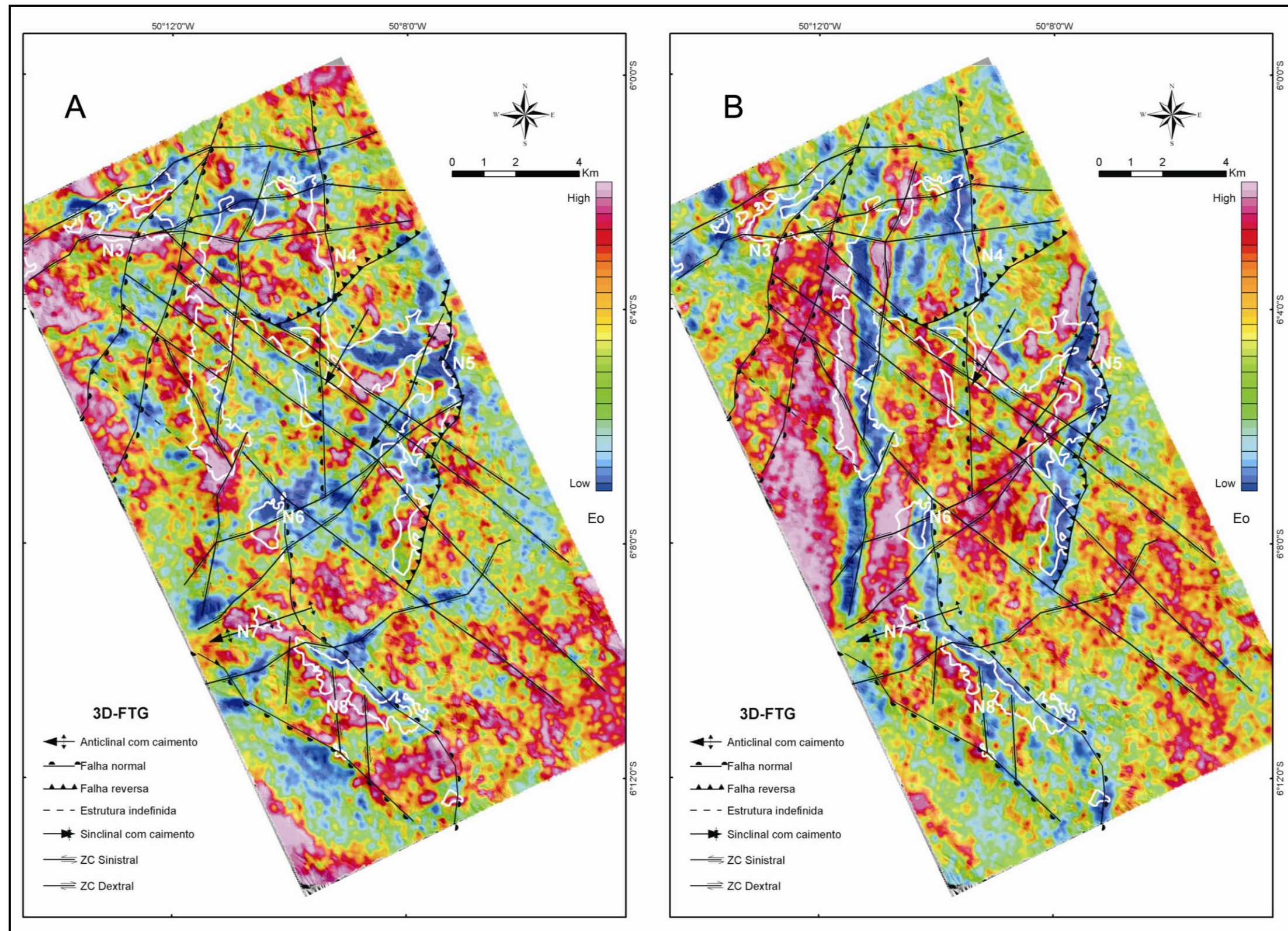


Figura 6-21: Interpretação estrutural a partir das componentes  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  e  $T_{yz}$ . A) Interpretação estrutural sobre o grid da componente  $T_{yz}$ , realçando estruturas E-W; B) Interpretação estrutural sobre o grid da componente  $T_{xz}$ , realçando estruturas N-S.



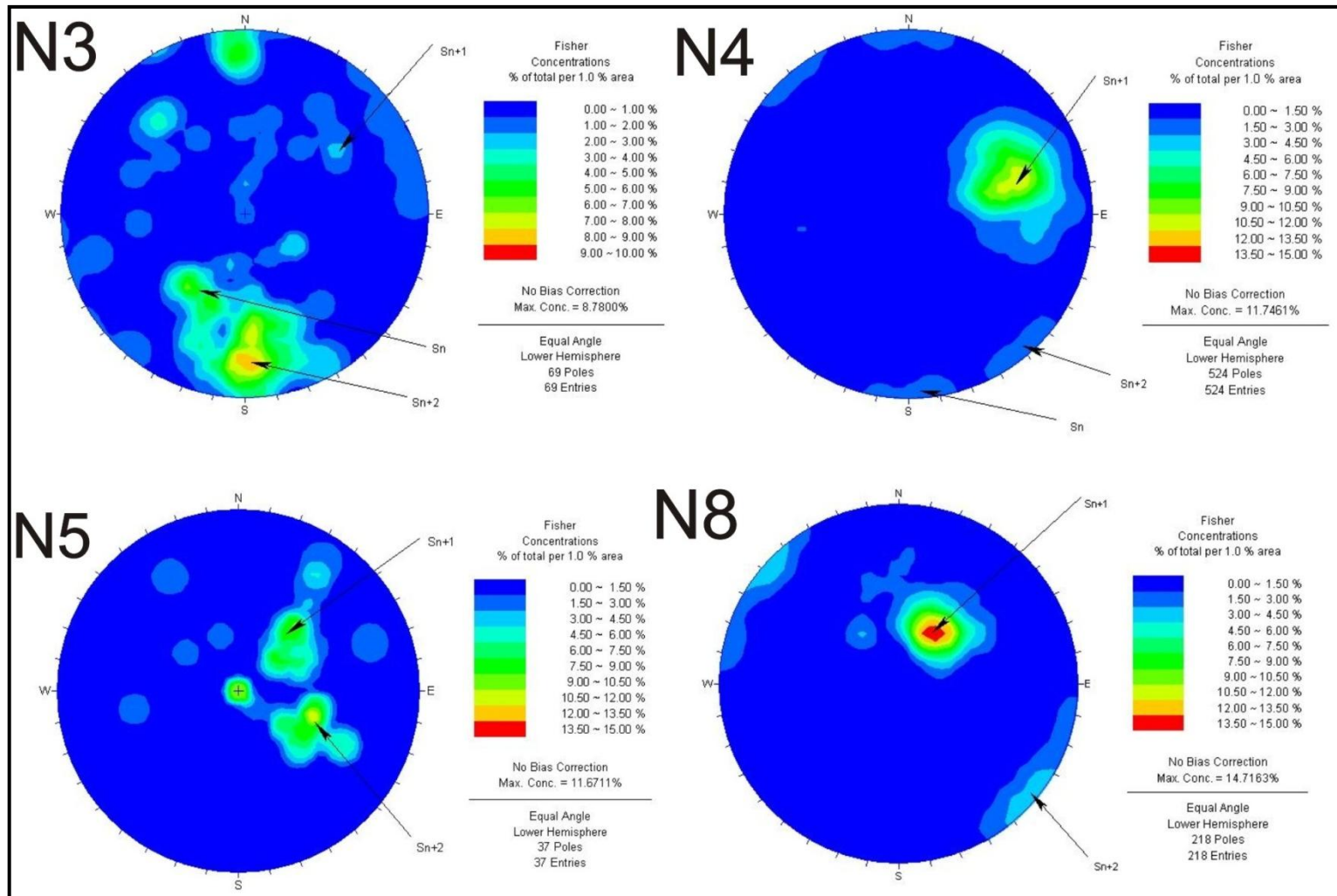


Figura 6-22: Diagramas de frequência das foliações e clivagens espaçadas nos corpos N3, N4, N5 e N8 obtidas em campo que corroboram as interpretações estruturais.



#### **6.5.4 Modelagem tridimensional a partir da inversão dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG e sua aplicação da geofísica na estimativa de recursos para exploração mineral near mine**

Através da modelagem tridimensional a partir da inversão dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG, segundo metodologia sugerida por Li e Oldenburg (1998) e Li (2001) é possível realizar a estimativa de massa para um determinado depósito de minério de ferro. Essa prática vem sendo adotada pela empresa Vale nos projetos near mine para minério de ferro, o que confere rapidez e base de informação segura para a tomada de decisão.

Neste trabalho foram comparados os resultados das estimativas de massas dos recursos de minério de ferro geradas a partir dos modelos de inversão, modelos geológicos e modelo de voxels, sendo que foram selecionadas três áreas em Serra Norte, N3, N6 e N8, por serem áreas que não possuem atividade de mineração, permitindo realizar comparações entre dados obtidos em períodos de tempo diferentes.

O método usual para se obter a estimativa de massa dos depósitos é através da construção de seções geológicas verticais suportadas pelas informações de sondagem diamantada e mapa de superfície. Posteriormente, é efetuada uma extrusão lateral dos polígonos destas seções para geração de um modelo tridimensional, que por sua vez é discretizado em blocos e sub-blocos.

O modelo tridimensional de voxels foi gerado através da interpolação por mínima curvatura, gerando voxels de lados com 25m a partir dos dados de caracterização litológica interpretada das interseções existentes nos furos de sondagem rotativa diamantada, considerando os parâmetros de granulometria e resultados químicos.

Na Figura 6-23 pode-se observar o modelo tridimensional para N3, obtido a partir da inversão dos dados 3D-FTG, com os maiores contrastes de densidade, podendo ser associados às mineralizações de minério de ferro. Neste modelo foi obtido o volume de 42.746.375 m<sup>3</sup>, que assumiram a densidade média dos hematititos friáveis de 3,12 ton/m<sup>3</sup>, totalizando a massa em torno de 133Mt. Em N6 com o mesmo raciocínio

anterior e conforme apresentado na Figura 6-24, os maiores contrastes de densidade totalizam o volume de 12.718.750m<sup>3</sup>, o que gera uma massa de cerca de 40Mt. Para N8, Figura 6-25, o volume obtido é de 50.625.000m<sup>3</sup>, gerando a massa de quase 157Mt.

Quando visto em seção, o modelo de inversão dos dados 3D-FTG mostra boa aderência aos furos de sondagem e ao modelo geológico, como por ser visto na Figura 6-26, Figura 6-27 e Figura 6-28, onde é mostrada a interseção dos furos de sonda com o modelo de inversão.

Comparando os valores de massa obtidos a partir da inversão dos dados 3D-FTG com os obtidos a partir da modelagem geológica, observa-se que a média da diferença entre as metodologias de estimativas de recursos potenciais a partir dos modelos geológicos, de voxels das interseções com minérios de ferro em furos de sonda e inversão dos dados 3D-FTG fica em torno de 20%, sendo que os piores valores foram observados nos modelos de N6 e os melhores nos modelos de N8 (Tabela 6-2). As baixas diferenças se devem ao correto ajuste dos altos valores de densidade para cada modelo, sendo um processo realizado de forma qualitativa, mas com critérios suficientes para se estabelecer premissas para a geração do modelo de inversão e posterior estimativa de recursos. De uma forma geral, as estimativas de massas são satisfatórias, uma vez que são obtidas integralmente de forma indireta, sendo a inversão uma poderosa ferramenta de avaliação prévia de alvos.

**Tabela 6-2: Tabela comparativa entre as metodologias de estimativa de recursos potenciais.**

Metodologia de modelagem	Relação entre as massas de recursos			Média
	N3	N6	N8	
Inversão FTG / Geológica	0,74	0,71	0,89	0,78
Voxel Lito / Geológico	0,74	0,40	1,14	0,76
Inversão FTG / Voxel Lito	1,00	1,79	0,78	1,19

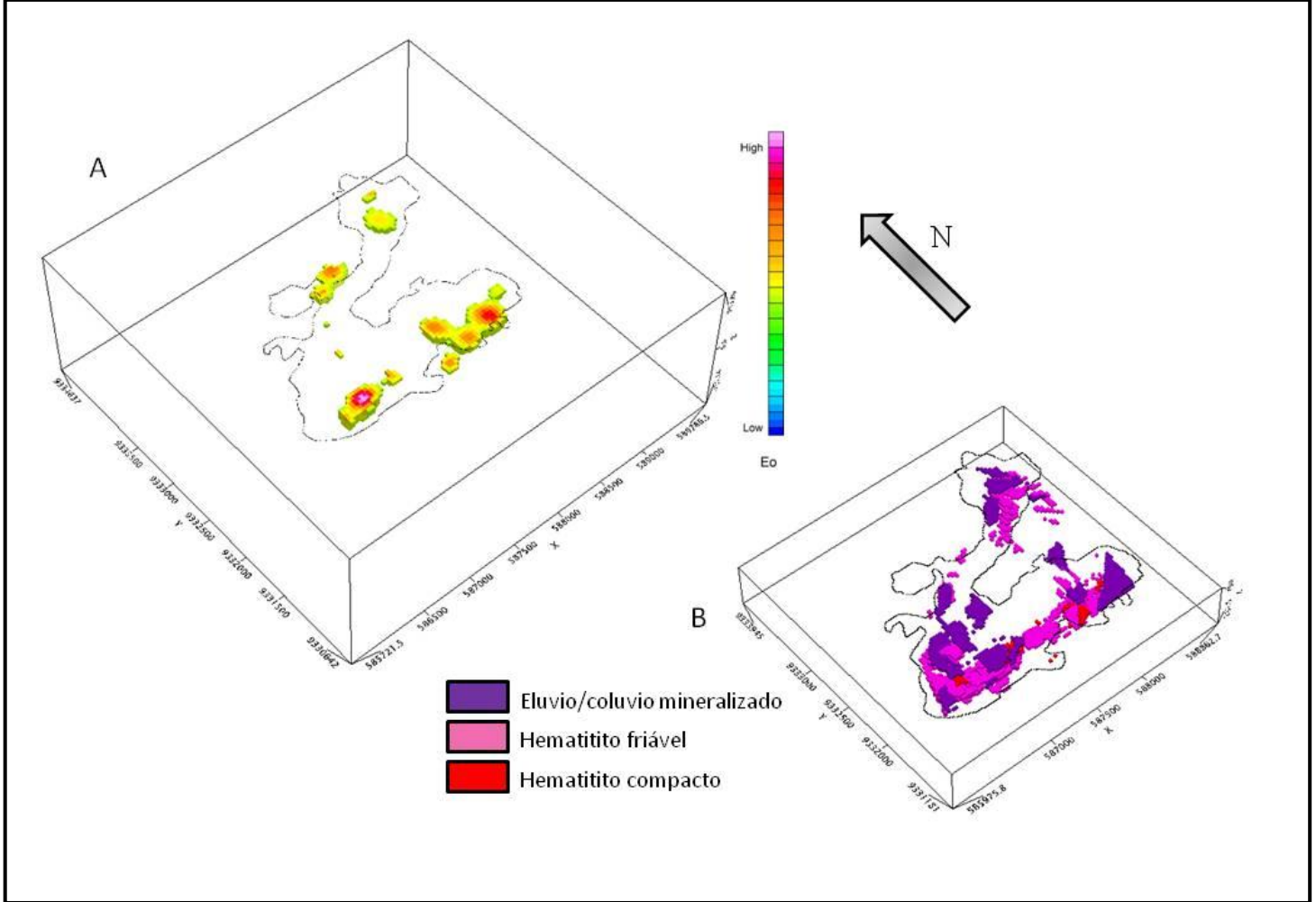


Figura 6-23: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N3. A) Modelo tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro.

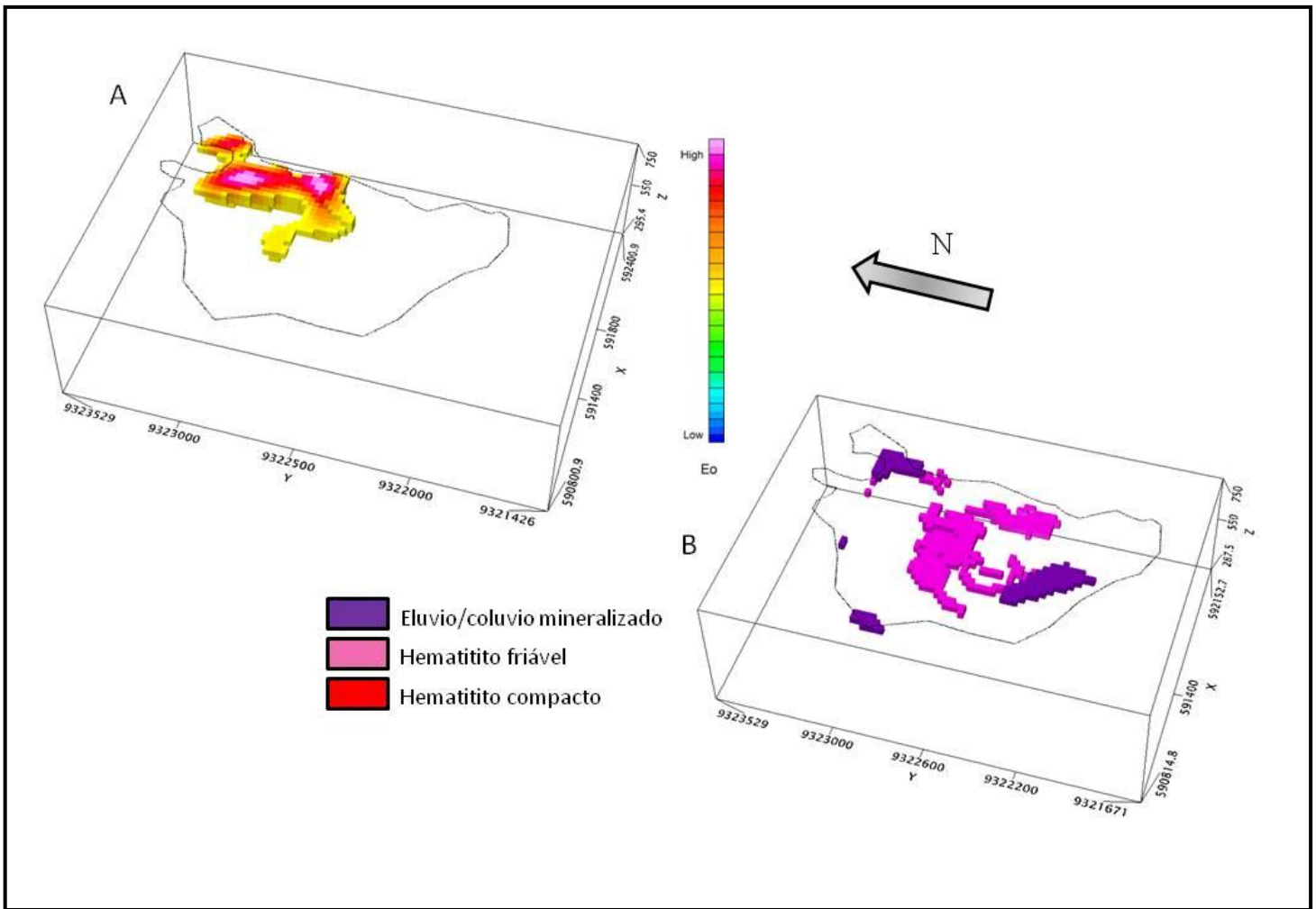


Figura 6-24: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N6. A) Modelo tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro.



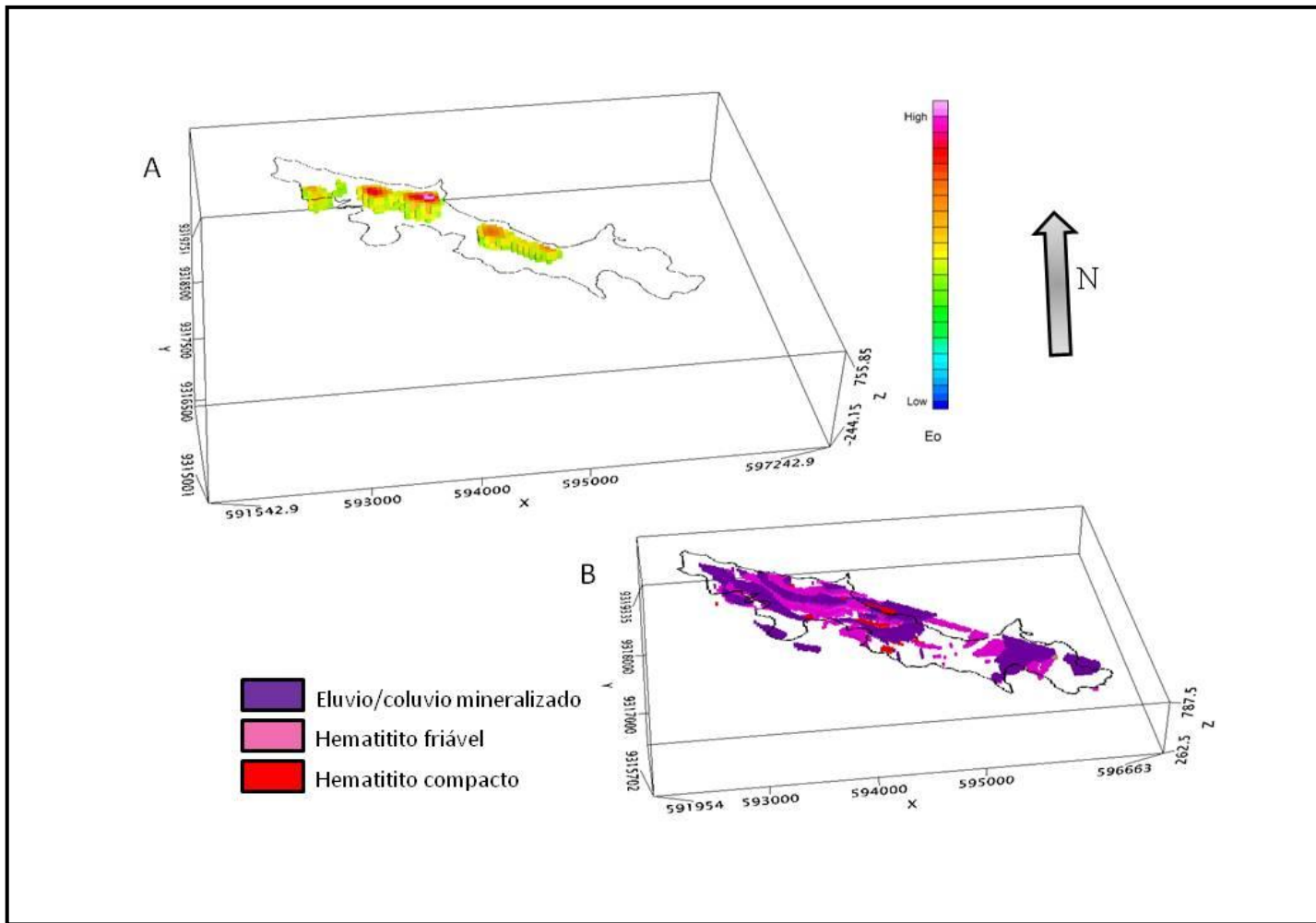


Figura 6-25: Comparação entre os modelos de inversão e o de voxels em N8. A) Modelo tridimensional dos altos contrastes de gradiente que estão relacionados com os corpos de minério de ferro; B) Modelo de voxels das interseções de minério de ferro.

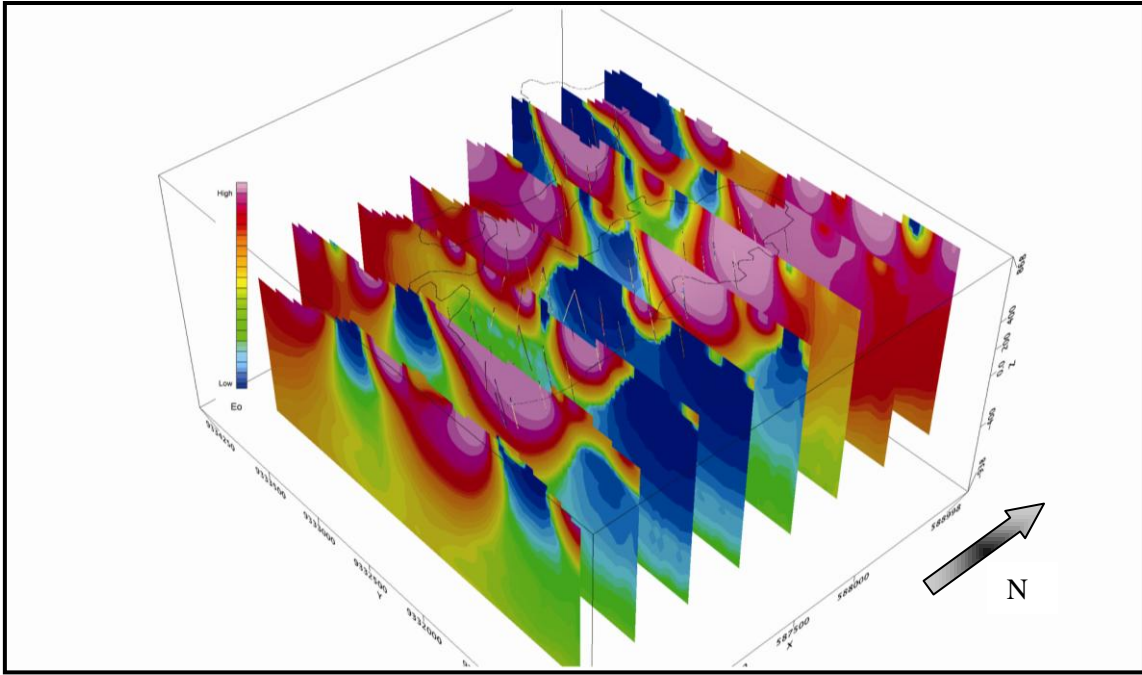


Figura 6-26: Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N3, mostrando a projeção dos furos de sonda.

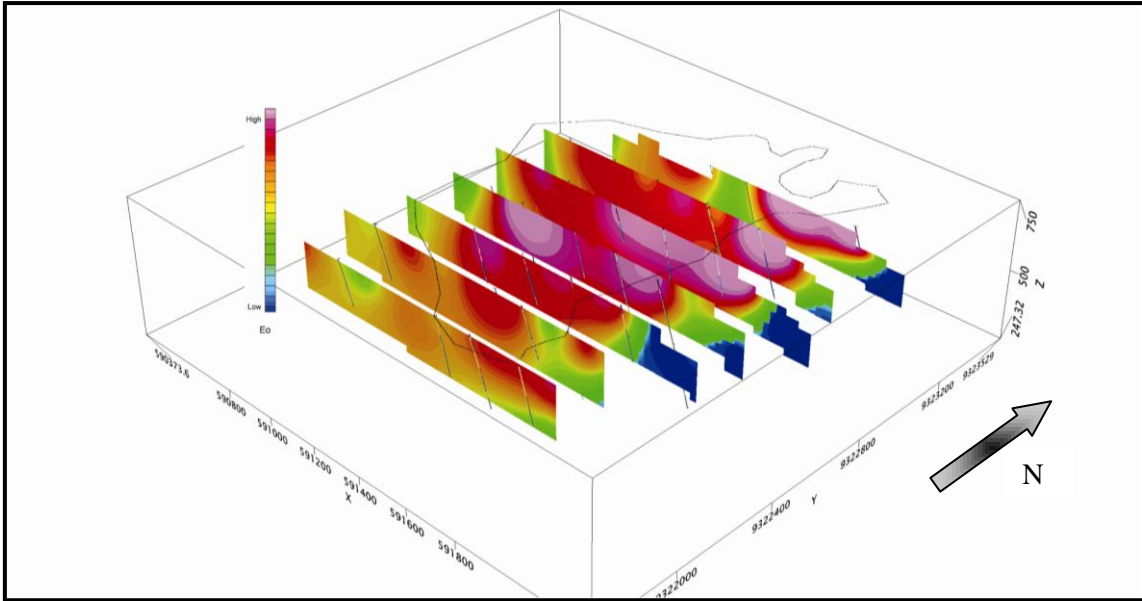
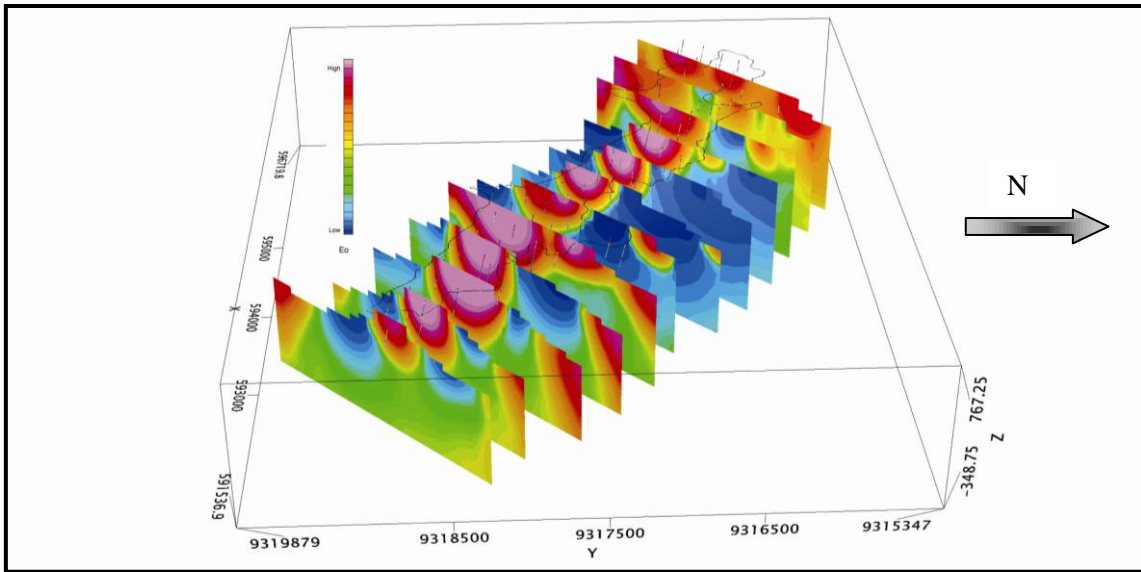


Figura 6-27: Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N6, mostrando a projeção dos furos de sonda.



**Figura 6-28:** Seções transversais do modelo tridimensional de inversão dos dados 3D-FTG, em N8, mostrando a projeção dos furos de sonda.

## 6.6 Conclusões

Através de técnicas de processamento e realce aplicadas em dados de aerolevantamentos magnetométricos, gamaespectrométricos e gravimétricos gradiométricos, usuais à academia e ao setor mineral, foi possível definir critérios suficientes para a avaliação preliminar de depósitos de minério de ferro, bem como, estabelecer controles em superfície e subsuperfície que permitiram o delineamento da envoltória da formação ferrífera em três dimensões, sua compartimentação estrutural e a estimativa de massa dos recursos de minério de ferro. Ressalta-se que as estimativas de massas possuem um nível de confiança aceitável, devendo-se considerar que foram obtidas através de métodos indiretos, independente da existência de vegetação ou acesso ao local, o que é comum na região amazônica.

Como fronteira a ser explorada, sugere-se o desenvolvimento e consolidação de metodologias de geração de modelos tridimensionais a partir da inversão conjunta dos dados magnetométricos e gravimétricos gradiométricos, na tentativa de refinar e diferenciar tipologias de minério de ferro e protominérios. Para auxiliar no mapeamento do regolito em escala de detalhe, sugere-se a aquisição de dados gamaespectrométricos com espaçamento de 125m como alternativa aos sensores orbitais multiespectrais.

Com a associação das ferramentas discutidas neste trabalho e com os desenvolvimentos sugeridos, acredita-se que seja possível auxiliar a tomada de decisão e direcionar os trabalhos exploratórios, para o melhor aproveitamento dos recursos humanos e financeiros.

## 6.7 Agradecimentos

Agradecemos a Vale S.A. pela liberação de dados geológicos e geofísicos para a realização desse trabalho de pesquisa. Aos colegas da Vale e da UnB pelas contribuições e discussões sobre o minério de ferro em Carajás e suas encaixantes. Ao ICMBio e à Floresta Nacional de Carajás por permitir o desenvolvimento dos trabalhos nesta unidade de conservação de uso sustentável, dando a oportunidade de mostrar que a mineração e a conservação da natureza são atividades compatíveis. Aos Professores Dr. Joel Buenano Macambira e Dr. Welitom Rodrigues Borges pelas contribuições e sugestões. Professora Adalene Moreira Silva agradece a bolsa de produtividade em pesquisa Processo CNPQ -303275/2011-1.



## 6.8 Referências Bibliográficas

Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N., Jorge João, X.S., Costa, J.B.S., 1988, A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás: Anais do Congresso Latinoamericano de Geologia, v. 1, p. 324-338.

Araújo, O. J. B. & Maia, R. G. N., 1991, Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás, in: Subprojeto Recursos Minerais – Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. (Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM and Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM: Brasília, Brazil).

Avelar, V. G., Lafon, J. M., Correia Jr, F. C., Macambira, M. J. B., 1999, O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás: Novos dados geocronológicos: Revista Brasileira de Geociências, v. 29(4), p. 453-460.

Beisiegel, V.R., Bernardelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., Tremaine, J.W., 1973, Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 3, p. 215-242.

Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H., 2003, Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, Brasília, Brasil, p. 674.

Blakely, R.J. & Simpson, R.W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: Geophysics, v. 51 (7), p. 1494-1498.

Boyle, R. W., 1982, Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits: Developments in Economic Geology, v. 16, p. 71-78.

Braga, M. A., 2009, Aplicação de Aerogravimetria Gravimétrica 3D-FTG na Prospecção de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e modelagem 2D e 3D para estimativa de massa do depósito de ferro de N1 em Carajás (PA); UFRJ, Tese de Doutorado, p. 271.

Braga, M. A., Galbiatti, H., Carlos, D. U., Sousa, R. R., Almeida, T., 2009, Planejamento e controle de qualidade de dados de gravimetria gravimétrica 3D-FTG: Revista Brasileira de Geofísica, v.27(3), p. 447-457.

Dalstra, H., Guedes, S., 2004, Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: A comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores: Economic Geology, v. 99, p. 1793-1800.

Dardenne, M.A. & Schobbenhaus, C., 2001, Metalogênese do Brasil: Editora Universidade de Brasília, p. 392.

DOCEGEO, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás: Anais do congresso Brasileiro de Geologia, v. 35, p. 10-54.

Efimov, A. V., 1978, Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym: Metody rudnoj geofiziki, Leningrado Naucnoproizvodstvennjoc objedinenie geofizica, p. 59-68.

- Figueiredo e Silva, R. C., 2004, Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1, N4W, N4E e N5E, Província Mineral Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro: MSc dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia, Belo Horizonte, Brasil, p. 155.
- Flis, M., 2008, Advances in Geophysics Applied to the Search for Banded Iron Formation-Related, High-Grade Hematite Iron Ore, In: Banded Iron Formation-related high-grade iron ore: Reviews in Economic Geology, v. 15, p. 381-392.
- Galbiatti, H., Braga, M. A., Carlos, D. U., Sousa, R. R., 2011, Sistemas aerogravimétricos gradiométricos 3D-FTG e Falcon na exploração de minério de ferro: Revista Brasileira de Geofísica, v. 24 (4), p. 801-810.
- Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata W.K., Olszewski, W.S., 1986, Age and composition of the Grão Pará group volcanics, Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 16(2), p. 201-211.
- Gibbs, A.K. & Wirth K.R., 1990, Geologic setting of the Serra dos Carajás Iron Deposits, Brazil: Theophrastus Publications, p. 83-102.
- Hutchinson, M. F.; Stein, John A.; Stein, Janet L.; Xu, T, 2009, Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia
- Klein, C. & Ladeira, E. A., 2002, Petrology and geochemistry of the least-altered banded Iron-formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil: Economic Geology, v. 97, p. 643-651.
- Lengyel, Eric. “Voxel-Based Terrain for Real-Time Virtual Simulations”, 2010, Doctor of Philosophy Thesis, University of California at Davis, p. 95.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998, 3-D inversion of gravity data: Geophysics, v. 63(1), p. 109-119.
- Li, Y., 2001, 3-D Inversion of gravity gradiometer data: Expanded Abstract, 71th Ann. Int. Mtg. Soc. Explor. Geophys., Tulsa.
- Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., Teixeira, J.B.G., 2001, Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 21-28.
- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M., 2005a, A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província, in Marini, O. J., Queiroz, E. T., Ramos, B. W., Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Lobato, L. M., Figueiredo e Silva, R. C., Rosière, C. A., Zucchetti, M., Baars, F. J., Pimentel, M. M., Rios, F. J., Seoane, J. C. S., Monteiro, A. M., 2005b, Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará state, Brazil: Iron Ore 2005, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series v. 8 (2005), Australia, p. 99-110.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará: Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, p. 217.

Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., and Lindenmayer, D., 1991, UPb geochronology of Archean magmatism and basement activation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil: *Precambrian Research*, v. 49, p. 329–354.

Mataragio, J., Jorgensen, G., Carlos, D. U., Braga, M. A., 2011, State of the Art Techniques for Iron Oxide Exploration: 12° International Congress of the Brazilian Geophysical Society, v. 1.

Meireles, E.M., Teixeira, J.T., Lourenço, R.S., Medeiros Filho, C.A., 1982, Geologia, estrutura e mineralização aurífera de Serra Pelada. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador, Anais, v. 3, p. 900-911.

Meireles, E.M., Silva, A.R.B., 1988, Depósitos de ouro de Serra Pelada, Marabá, Pará. In: Schobbenhaus, C., Coelho, C.E.S. (coords.), Principais Depósitos Minerais do Brasil, DNPM, Brasília, v.III, p.547-557.

Meirelles, M.R., 1986, Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás, Pará: Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 171 p.

Monteiro, P. C., Rolando, A. P., Macambira, M. J. B., 2004, Proveniência de zircão de quartzitos da Formação Gorotire e Grupo Rio Fresco, Serra do Inajá, Sul da Província Mineral de Carajás: Anais do 42° Congresso Brasileiro de Geologia, 2004, Araxá.

Murphy, C. A., 2004, The Air-FTG® airborne gravity gradiometer system. In R.J. Lane, editor, Airborne Gravity 2004 – Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop: Geoscience Australia Record v. 18 (2004), p. 7-14.

Murphy, C. A., 2007, Interpreting FTG Gravity data using horizontal Tensor components: EGM 2007 International Workshop – Innovation in EM, Grav and Mag methods: new Perspective for Exploration.

Nabighian, M.N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, v.37, p. 507-517.

Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations: *Geophysics*, v. 49, p. 780-786.

Olszewski, W. J., Wirth, K. R., Gibbs, A. K., Gaudette, H. E. 1989. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks. Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting: *Precambrian Research*, v. 42, p. 229-254.

Pedersen, L. B. & Rasmussen T. M., 1990, The gradient tensor of potential field anomalies: some implications on data collection and data processing of maps: *Geophysics*, v. 55, p. 1558-1566.

Pereira, R. M. P., 2009, Geologia da região sul da Serra Norte e características do minério de ferro do depósito N8, Província Mineral de Carajás: Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 131.

Phillips, J. D., 2000, Locating magnetic contacts: A comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. In: 70th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, p. 402-405.

- Pidgeon, R., Macambira, M. J. B., Lafon, J. M., 2000, Th-U-Pb isotopic systems and internal structures from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite: *Chemical Geology*, v. 166, p.159-171.
- Pimentel, M.M., Machado, N., 1994, Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará: SBG, Congresso Brasileiro Geologia 38, Camburiú, Anais, v. 2, p. 390-391.
- Pinheiro, R.V.,L., and Holdsworth, 1997, The structure of the Carajás ironstone deposit and associated rocks: Relationship to archean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 10, p. 305–321.
- Prichystal, A., Gnojek, I., 1985, A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia): *Geoexploration*, v. 23, p. 491-502.
- Resende N.P., e Barbosa A.L.M., 1972, Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. AMZA, Relatório Final de Pesquisa, v. 1, texto, 248 p, v. 2, mapas e seções geológicas, p. 119.
- Rio Doce Geologia e Mineração, 1984, *In*: Meireles, E. M., Hirata, W. K., Amaral, A. F., Medeiros Filho, C. A., Gato, W. C., 1984, Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral de Carajás, Estado do Pará: Anais do 33º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 5, p. 2164-2174.
- Rodrigues E., Lafon J.M., Scheller T., 1992, Geocronologia Pb-Pb da Província mineral de Carajás: primeiros resultados: Congresso de Geologia, São Paulo, Boletim de Resumos expandidos, v. 37, p.183-184.
- Roest, W. R., Verhoef, V., Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, v. 57, p. 116–125.
- Rosière, C.A., Seoane, J.C.S., Baars, F.J., Lobato, L.M., 2004, Estruturação da província de Carajás e sua influência na mineralização de ferro, PA: ADIMB, Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, CD-ROM.
- Rosière, C. A., Baars, F. J., Seoane, J. C. S., Lobato, L. M., da Silva, L. L., de Souza, S. R. C., Mendes, G. E., 2005, Structure and iron mineralisation of the Carajás Province, in: *Proceedings Iron Ore 2005*, p. 143-150 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Silva, G.G., Lima, M.J.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G., 1974, Levantamentos de recursos naturais, geologia, folhas SB 22 Araguaia e parte SC 22 Tocantins: Projeto RADAM BRASIL. Rio de Janeiro, p. 143.
- Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., Scheller, T., 1996, Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaúnas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas: SBG, V Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, p. 380–382.
- Souza, Z.S., Potrel, A., Lafon, J.M., Althoff, F.J., Pimentel, M.M., Dall’Agnol, R., Oliveira, C.G., 2001, Nd, Pb, and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, v. 109, p. 293-315.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 1999, Geochronological Provinces of the Amazonian Craton: *Episodes*, v. 22(3), p. 174-182.



Tassinari, C.C.G., 1996, O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, p. 139.

Teixeira, J.B.G., 1994, Geochemistry, Petrology, and Tectonic Setting of Archean Basaltic and Dioritic Rocks from the N4 Iron Deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil: Doctor of Philosophy Thesis, Department of Geosciences, Penn State University, p. 161

Teixeira, J.B.G., Ohmoto, H., Eggler, D.H., 1997, Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil, in, Costa, M.L., Angélica, R.S., Contribuições a Geologia da Amazônia, FINEP/SBG, p. 161-203.

Tolbert G.E., Tremaine J.W., Melcher G.C., Gomes C.B., 1971, The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil: *Economic Geology*, v. 7, p. 985-994.

Trendall, A.F., Basei, M.A.S., de Laeter, J.R., and Nelson, D.R., 1998, Ion microprobe zircon, U-Pb results from the Carajás area of the Amazon Craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 11, p. 265–276.

Valadão, C., Chausson, D.S., Moura, L.G.B., Mastrela, R., 2012, Resource and Reserve Statement, Vale - Iron Ore, Annual Report, p. 13.

Wilford, J. R., Bierwirth, P. N., Craig, M. A., 1997, Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17(2), p. 201–216.

Wirth, K.R., Gibbs, A.K., and Olzewski, Jr., W.J., 1986, U-Pb zircon ages of the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 195–200.

Zucchetti, M., 2007, Rochas máficas do Supergrupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA: Tese de Doutorado, UFMG, Minas Gerais, Brasil, p. 166.

Zacchi, E. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K., 2010, Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 643-656.

## 7 Conclusões e Sugestões

Esta dissertação de mestrado enfoca, principalmente, que com a utilização de métodos geofísicos indiretos é possível estabelecer critérios para a definição e ranqueamento de alvos e depósitos de minério de ferro, mesmo que sejam de menor expressão, como é o caso de N6.

Como ferramenta para mapear a superfície do terreno a gamaespectroscopia se mostrou válida, com capacidade de discriminar as formações ferríferas aflorantes, das coberturas lateríticas e das encaixantes, pelo fato de possuir assinatura gamaespectrométrica muito distinta das demais litologias. O Fator F e razão eU/K, contribuíram apontando possíveis condutos hidrotermais e discriminando as encaixantes sedimentares clásticas, predominantemente arcoseanas.

A identificação de feições magnéticas e estruturas interessantes sob o ponto de vista prospectivo mostra que os corpos mineralizados com alto teor não são mapeados ou apresentam baixo gradiente na amplitude do sinal analítico. Através da análise dos produtos derivados dos dados magnetométricos, principalmente na amplitude do sinal analítico de ordem zero, foi verificada a correlação entre as formações ferríferas em superfície e subsuperfície com as anomalias observadas, devido à presença de magnetita e martita na paragênese mineral destas formações. A validação efetuada com os furos de sondagem e modelo de voxels gerado a partir dos litotipos interceptados na sondagem confirma essa premissa e mostra que a magnetita está mais associada ao protominério e a martita ao minério de ferro. Pontualmente pode-se observar a perda do magnetismo em função da oxidação presente no minério de ferro.

Os resultados obtidos com o realce dos dados do aerolevanteamento 3D-FTG permitiu o delineamento dos corpos com contrastes de densidade, a interpretação do arcabouço estrutural e a estimativa de recursos de minério de ferro. A divergência verificada entre os valores obtidos a partir da modelagem tridimensional da inversão dos dados 3D-FTG e da modelagem geológica através da modelagem de seções 2D e extrusão é aceitável como uma primeira aproximação na estimativa de recursos, uma vez que é obtida a partir de dados indiretos e premissas pré-estabelecidas.

Os resultados mostram que é possível contribuir para o entendimento do comportamento das formações ferríferas através do emprego de métodos aerogeofísicos de alta resolução em brownfield, bem como auxiliar com novas ferramentas para a análise do contexto geológico desta porção da Província Mineral de Carajás.

Sugere-se ainda utilização de dados de aerolevantamentos gamaespectrométricos de alta resolução em função do planejamento da aquisição com linhas de voo menos espaçadas e altitudes mais baixas. Os resultados, provavelmente, darão uma grande contribuição nos trabalhos de mapeamento de superfície, mesmo em áreas com densa vegetação ou acesso difícil, que é o caso da floresta amazônica.

A geração de modelos tridimensionais a partir da inversão de dados de aerolevantamentos geofísicos, tais como a magnetometria e gradiometria gravimétrica deve ser expandida em outras áreas, pois permitirão a extração de informações que não são facilmente interpretadas em mapas bidimensionais. O modelo de inversão de dados magnetométricos poderá auxiliar na definição do limite do perfil de intemperismo entre o minério de ferro e seu protominério, principalmente quando o modelo de inversão da gradiometria gravimétrica não for eficaz nessa questão.

Associando as três ferramentas aqui discutidas, com as melhorias sugeridas, acredita-se que seja possível estabelecer trabalhos exploratórios com boa confiança em regiões ínvias ou que ofereçam restrições de acesso, tornando os trabalhos em campo mais direcionados, melhor utilização dos recursos humanos e financeiros.

## 8 Referências Bibliográficas

- Blakely, R.J. & Simpson, R.W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: *Geophysics*, v. 51 (7), p. 1494-1498.
- Boyle, R. W., 1982, Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits: *Developments in Economic Geology*, v. 16, p. 71-78.
- Efimov, A. V., 1978, Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado Naucnoproizvodstvennjoc objedinenie geofizica, p. 59-68.
- Galbiatti, H., Braga, M. A., Carlos, D. U., Sousa, R. R., 2011, Sistemas aerogravimétricos gradiométricos 3D-FTG e Falcon na exploração de minério de ferro: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24 (4), p. 801-810.
- Hutchinson, M. F.; Stein, John A.; Stein, Janet L.; Xu, T, 2009, Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia
- LASA, 2010. Relatório do Levantamento Aéreo de Magnetometria, Áreas “Cebus 2, 3A e 3B” - Carajás, v. 1.
- Lengyel, Eric. “Voxel-Based Terrain for Real-Time Virtual Simulations”, 2010, Doctor of Philosophy Thesis, University of California at Davis, p. 95.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998, 3-D inversion of gravity data: *Geophysics*, v. 63(1), p. 109-119.
- Li, Y., 2001, 3-D Inversion of gravity gradiometer data: Expanded Abstract, 71th Ann. Int. Mtg. Soc. Explor. Geophys., Tulsa.
- Mataragio, J., Jorgensen, G., Carlos, D. U., Braga, M. A., 2011, State of the Art Techniques for Iron Oxide Exploration: 12<sup>o</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, v. 1.
- Murphy, C. A., 2004, The Air-FTG® airborne gravity gradiometer system. In R.J. Lane, editor, *Airborne Gravity 2004 – Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop: Geoscience Australia Record v. 18 (2004)*, p. 7-14.
- Murphy, C. A., 2007, Interpreting FTG Gravity data using horizontal Tensor components: *EGM 2007 International Workshop – Innovation in EM, Grav and Mag methods: new Perspective for Exploration*.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations: *Geophysics*, v. 49, p. 780-786.
- Pedersen, L. B. & Rasmussen T. M., 1990, The gradient tensor of potential field anomalies: some implications on data collection and data processing of maps: *Geophysics*, v. 55, p. 1558-1566.
- Phillips, J. D., 2000, Locating magnetic contacts: A comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. In: 70th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 402-405.



Prichystal, A., Gnojek, I., 1985, A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia): *Geoexploration*, v. 23, p. 491-502.

Resende N.P., e Barbosa A.L.M., 1972, Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. AMZA, Relatório Final de Pesquisa, v. 1, texto, 248 p, v. 2, mapas e seções geológicas, p. 119.

Roest, W. R., Verhoef, V., Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, v. 57, p. 116–125.

Tolbert G.E., Tremaine J.W., Melcher G.C., Gomes C.B., 1971, The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil: *Economic Geology*, v. 7, p. 985-994.

Valadão, C., Chausson, D.S., Moura, L.G.B., Mastrela, R., 2012, Resource and Reserve Statement, Vale - Iron Ore, Annual Report, p. 13.

Wilford, J. R., Bierwirth, P. N., Craig, M. A., 1997, Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology: *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, v. 17(2), p. 201–216.

Zacchi, E. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K., 2010, Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28, p. 643-656.

## Anexo I

# **An Exploratory Approach for Iron Ore in Serra Norte, Carajás**

## **An Exploratory Approach for Iron Ore in Serra Norte, Carajás**

**\*Artigo submetido na Economic Geology**

1

**Luciano Mozer de Assis**

**Vale S.A., Mina de Águas Claras, Avenida de Ligação, nº 3580, Nova Lima, Minas Gerais,  
Brazil, Zip code: 34000-000**

**Adalene Moreira Silva**

**Laboratory of Applied Geophysics, Institute of Geosciences, University of Brasilia,  
Distrito Federal, Brazil, Zip code: 70910-900**

**Dionisio Uendro Carlos**

**Vale S.A., Mina de Águas Claras, Avenida de Ligação, nº 3580, Nova Lima, Minas Gerais,  
Brazil, Zip code: 34000-000**

**Marco Antonio da Silva Braga**

**Vale S.A., Mina de Águas Claras, Avenida de Ligação, nº 3580, Nova Lima, Minas Gerais,  
Brazil, Zip code: 34000-000**

**Corresponding author: e-mail, [luciano.assis@vale.com](mailto:luciano.assis@vale.com) / [luciano.mozer@gmail.com](mailto:luciano.mozer@gmail.com)**

## Abstract

This paper proposes an integrated exploration model for iron ore in the Serra Norte portion of Carajás Mineral Province (PMC), located in the state of Pará. PMC hosts some world class deposits and one of the largest iron ore mines in the world, N4, run by Vale S.A. mining company. The company is constantly running greenfield and brownfield exploration programs for this commodity in the whole Carajás region, aiming at keeping its market share in the transcontinental market. Gamma ray spectrometric data allowed us to individualize signatures associated with outcropping iron formations related to Carajás Formation, considering low levels of K, eU and eTh radioelements. By assessing airborne magnetic data it was possible to observe that highly mineralized bodies are not mapped or present a low gradient of amplitude in the analytic signal and we could notice the correlation between surface and subsurface iron formations with the anomalies observed. The gravimetric gradiometry of the Full Tensor Gravity Gradiometry (3D-FTG) system allowed designing the encasing of the anomalous body and interpreting the structural framework by means of the gravimetric gradient components. The three-dimensional modeling methodology based on the inversion of gradiometric gravimetry data was compared with the conventional geologic modeling and the results obtained were successful, since the difference of the amounts of mineral resources volumes obtained with both modeling methods was at about 20%. This confirms the reliability of the use of inversion model in the preliminary evaluations of mineral resources and also brings a safe direction and allows a better use of human and financial resources in iron ore exploration programs.



## Introduction

Iron ore is a commodity used by mankind since early times, and after the industrial revolution in the eighteenth century it became one of the pillars of humankind development. More recently, by the beginning of the XXI century, iron ore has experienced a strong growth of demand boosted by the increase of consumption in rich countries and by the development of Asian countries, particularly China, which has caused prices to rise and started the exploratory race worldwide. Together with the development scenario, the budgets of iron ore exploration campaigns rose to be able to meet world demand programs through revaluation of deposits with mine operation, new discoveries and evaluations of up to now considered marginal deposits because of their low levels of ore and their logistic shortfalls. With the emergence of the global crisis by the end of the first decade of this century, mining companies had to revise their strategies and started a restructuring work with cost reductions and careful selection of projects.

Regardless of the economic environment, an exploratory approach that allows establishing criteria that bring to new discoveries with cost reduction and agility has become crucial to decide whether to continue with or implement new projects.

The application of potential methods has shown significant improvements due to the rapid advancement in the computational power of hardware, the reduction of acquisition costs and the improvement of data spatial resolution due to the technological evolution of equipment and the aerial platforms of acquisition. We have to consider also the positioning precision afforded by modern satellite positioning systems, and the improvements in physics which introduced new techniques such as aerial gravimetric gradiometry (Flis, 2008).

This work aims at presenting an exploratory approach for iron ore based on the integration of airborne gamma-spectrometric, magnetometric and gravimetric gradiometric data, using state of the art processing and enhancement methodologies to assist in the selection of targets for iron ore mineral exploration.

As testing area, we selected a portion of Serra Norte, where Vale mining company's iron ore mines are under operation in the Carajás Mineral Province, southeast of Pará (Fig. 1).

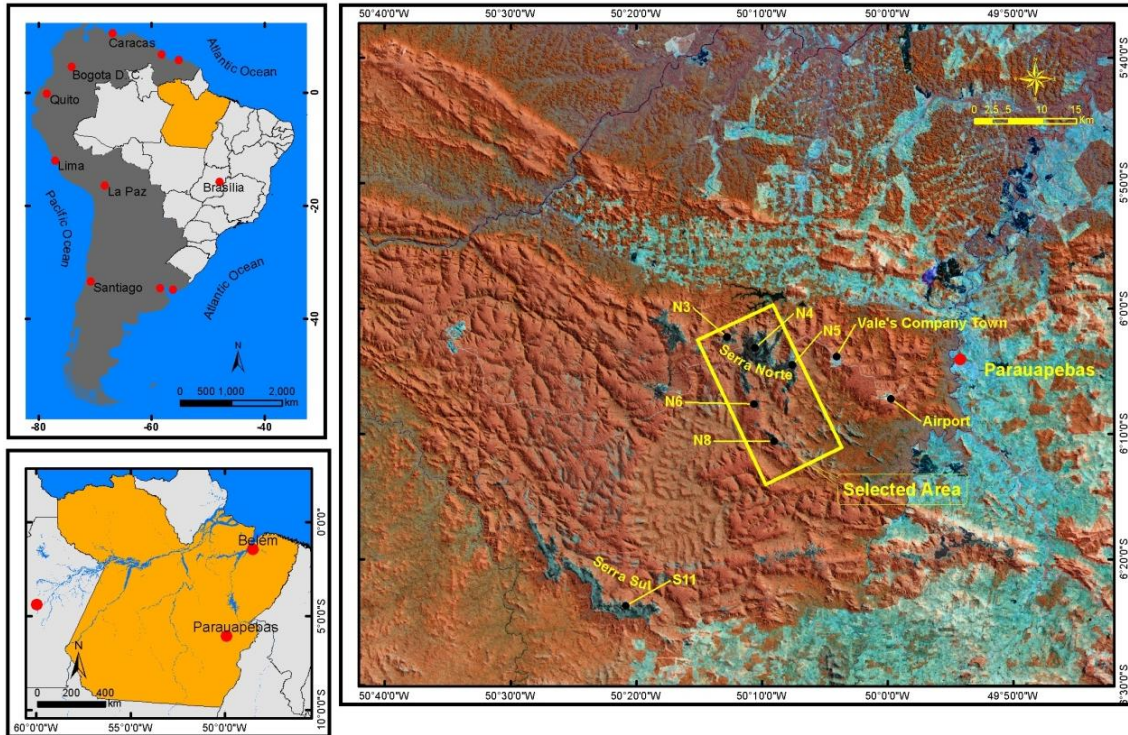


Fig. 1: Location map of the working area at Serra Norte, Carajás Mineral Province, Pará, Brazil. The working area is superimposed on the Landsat ETM image (RGB 453), showing Serra Norte and Serra Sul regions.

This portion of Serra Norte has five iron ore deposits, called, respectively, N3, N4, N5, N6 and N8 (Figure 6-1). Deposits N4 and N5 are being exploited since the late 1980s, with a production of about 100Mt per year in recent years. The remaining mineral resources audited in this region sum up about 4.2 Gton @ 66.22% Fe (Valadão et al., 2012).

## Geological Settings and Genesis of Iron Formations

Carajás Geological Province is located in the eastern-southeastern portion of the Amazon Craton, and is predominantly of early Archaean age (Gibbs, 1986; Machado et al., 1991). The province is divided into two domains (Tassinari et al., 1996; Bizzi et al., 2003): the South one is called Rio Maria, which is Mesoarchean in age and consists of granite-greenstone terrains; and the north area is called Carajás, which is predominantly Neoproterozoic in age and is composed of volcano-sedimentary and granitoid sequences (Figure 6-2).

Carajás domain is limited to the south by granite-greenstone terrains of Rio Maria domain and to the west it is covered by Mesoproterozoic age rocks belonging to Amazônia Central geologic province, to the north it is covered by Paleoproterozoic age rocks, belonging to the Bacajá domain of Transamazonas geologic province and to the east by the Araguaia mobile belt of Neoproterozoic age (Bizzi et al., 2003).

Despite the remarkable development over the last decades of the geological knowledge about Carajás Mineral Province, its deposits and the mineralizations associated to it, the integrated view of the regional geological framework has several gaps. This fact, which is mainly due to lack of regional works, has several problems, among which we can mention:

- The absence of widely accepted regional spectrum stratigraphic column;
- A considerable amount of detailed information about deposits or geologic features, without the support of a well delineated regional geologic framework;
- Very different and conflicting conceptions about the nature and evolution of the several mineral deposits in the region.

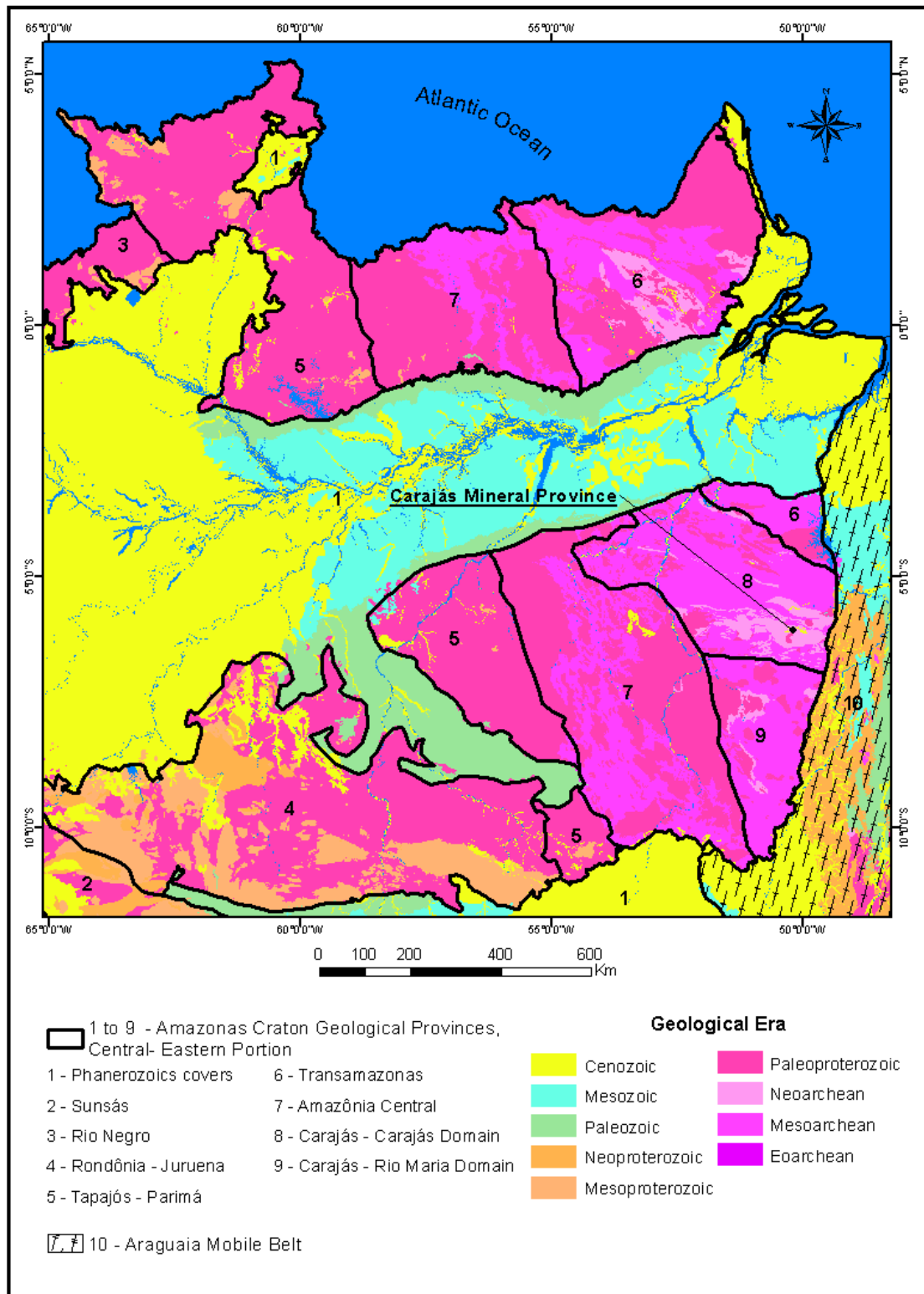


Fig. 2: The figure illustrates the tectonic position of Carajás Mineral Province (PMC) according to Tassinari & Macambira (1999) integrated with data of Brazil to the million map of Bizzi *et al.* (2003).



The oldest Archaean units representing Carajás domain basement, known as Xingu Complex, consist of granitic, tonalitic and trondhjemitic composition gneisses with intercalated amphibolites and tonalitic intrusions (Silva et al., 1974) and is aged circa  $2859 \pm 2$  M.y. (U-Pb zircon; Machado et al., 1991), migmatized in circa  $2851 \pm 4$  Ma. (U-Pb zircon; Machado et al., 1991). Small ortho- and paragneiss nuclei called Pium Complex aged circa  $3002 \pm 14$  Ma. (U-Pb zircon; Pidgeon et al., 2000) may be individualized in the southern portion of Carajás domain (Araújo & Maia, 1991). Data available in the literature show that the metamorphism of these rocks has occurred at around 2.8 Ga. (Machado et al., 1991; Roberts et al., 1992; Pimentel & Machado 1994; Pidgeon et al., 2000) (Figure 6-3).

Supracrustal rocks are represented by a succession of volcano-sedimentary rocks, represented by Itacaiúnas Supergroup (DOCEGEO, 1988), which brings together Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará, Igarapé Bahia and Buritirama groups that sustain the mountains and plateaus of the Carajás region. Among these units, stands out Grão Pará Group and, within it, Carajás Formation which consists of jaspilites that host the main iron ore bodies of the province. Besides Carajás Formation, Grão Pará Group also has a mafic volcanic sequence in the base referred to as Parauapebas Formation, and a basic volcanic sequence at the top, known as Igarapé Cigarra Formation (Macambira, 2003; Zuchetti, 2007) (Figure 6-3) .

These units have different metamorphic grades from greenschist facies to amphibolite and/or granulite facies (DOCEGEO, 1988; Olszewski et al. 1989; Machado et al., 1991) with ages around 2.68 Ga. and 2.57 Ga. (eg Machado et al., 1991; Souza et al., 1996; Trendall et al., 1998). Geochronological data available for the volcanism of Grão Pará Group show values of circa 2.75 Ga. (eg Wirth et al., 1986; Machado et al., 1991; Trendall et al., 1998).

Beisiegel et al. (1973) divides Grão Pará group into two paleovolcanic sequences, upper and lower, separated by Carajás Formation. The Lower Paleovolcanic Sequence called Parauapebas Formation by Rio Doce Geologia e Mineração (1984) is represented by hydrothermally altered mafic volcanic rocks with primary features preserved, such as tonsils, and intergranular texture.

The Upper Paleovolcanic Sequence, corresponding to Igarapé Cigarra Formation (Macambira, 2003; Zucchetti, 2007), consists of basic volcanic rocks similar to those of the Lower Paleovolcanic Sequence, distinguished from which by lenticular intercalations of iron formation. Authors are not anonymous about the stratigraphic position of this formation in Grão Pará Group. Teixeira (1994) and Teixeira et al. (1997), for instance, associate this unit to Igarapé Bahia group, positioned above Grão Para Group.

Carajás formation consists of banded iron formations (jaspilites), iron ore and its alteration products (Meirelles, 1986; Lindenmayer et al., 2001; Klein and Ladeira, 2002; Macambira, 2003; Figueiredo and Silva, 2004), which in Serra Norte reach an average thickness of 200 to 250m (Zucchetti 2007) (Figure 6-3).

Deposited over Grão Pará Group we find Águas Claras Formation basin, a sedimentary sequence consisting of conglomerates, sandstones, dolomites/limestones and gray, red and carbonaceous siltstones (Meireles et al., 1982; Meireles and Silva, 1988, Araújo and Maia, 1991), with depositional age of circa  $2681 \pm 5$  (Trendall, 1998). Souza et al. (2001) suggest that the deposition occurred in a passive continental margin environment as a result of regional strain (Figure 6-3).

Resting in opposite direction in relation to the Itacaiúnas Supergroup rocks we can observe the polymictic conglomerates of Gorotire Formation with maximum deposition age of around 2.0 Ga. (Monteiro et al., 2004). Pereira (2009) suggests that conglomerates in the Serra dos Carajás region do not belong to Gorotire Formation, and proposes creating another unit called Caninana Formation, with a minimum depositional age of 1.8 Ga. and a maximum of  $2.11 \pm 25$  Ga. However, we will adopt here the name Gorotire (Figure 6-3).

Granitic suites ages around 2.7 Ga. (Avelar et al., 1999) and 2.5 Ga. (Machado et al., 1991), represented by Plaquê, Estrela and Planalto intrusive units and by Velho Salobo monzogranites unit cut the older units. Anorogenic porphyry granites age 1.8 Ga. (Machado et al., 1991) represented by Serra dos Carajás and Cigano units are mapped (Figure 6-3).

The genesis of PMC iron ores is still widely debated among authors who highlight three basic models: supergenic, hypogenic and modified hypogenic.

For Tolbert et al. (1971), meteoric waters leaching was responsible for removing silica from iron formations, resulting in iron oxides residual enrichment and in the formation of the current ore bodies.

Beisiegel et al. (1973) suggest different origins for different PMC ores. For compact hematites, the authors suggest a hypogenic model that defends the involvement of hydrothermal fluids as drivers of quartz metasomatic replacement. For friable ores, they defend a supergenic enrichment. A supergenic origin for iron ores is also supported by Dardenne and Schobbenhaus (2001). These authors say the ore was formed by the action of lateritic alteration mechanisms with supergene leaching of jaspilites silica and a residual concentration of hematite.

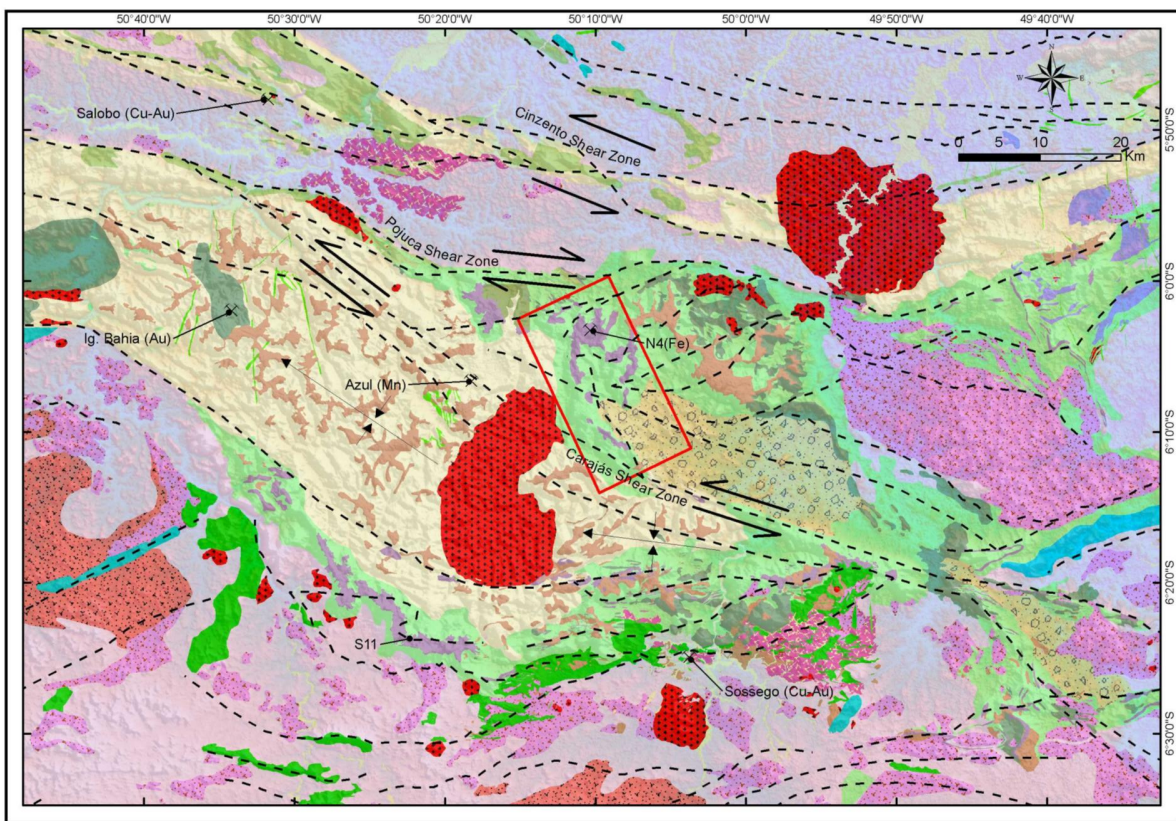
The action of hydrothermal fluids as responsible for iron mineralization is also postulated by Dalstra & Guedes (2004), Rosière et al. (2004, 2005) and Lobato et al. (2005a, 2005b). For Rosière et al. (2004, 2005), there is also a structural control in such mineralizations, since large bodies have developed in areas of higher permeability, i.e. in the synform Carajás hinge zone.

In terms of coverage, PMC iron formations are located in plateaus supported by lateritic crusts stretched over elevations normally with disconnected tops. These elevations are positioned in three main chains called Serra Norte, Serra Sul and Serra Leste, so named according to their position in relation to the whole Carajás mountain.

In Serra Norte, plateaus are named N1 to N9, but only plateaus N4 and N5 have iron mines in operation. The other areas (N1, N2, N3, N6, N7, N8 and N9) are little impacted areas which have been researched in recent years.

Figure 6-3 shows the regional geological map and its stratigraphic layering, modified according to Bizzi et al. (2003), considering the works done by Macambira (2003) and Pereira (2009), internal reports as well as interpretations derived from gamma-ray spectrometric and magnetometric data available for the region.

A



B

Supergroup	Group	Formation	Lithologies	Color/Map	Era	Age (Ma)	Reference	
Alluvial deposits			Sand and grave		Cenozoic	0.875	Bizzi et al. (2003)	
Covers			Sand, clay and laterite		Cenozoic	23.5	Bizzi et al. (2003)	
Itacainas		Gorotire	Conglomerates and sandstones		Paleoproterozoic	2,011 ± 25	Pereira (2009)	
		Agua Claras	Conglomerates, sandstones and siltstone		Neoproterozoic	2,681 ± 5	Trendall et al. (1998)	
	Igarapé Bahia		Igarapé Bahia	Banded iron formations, felsic and mafic volcanic rocks		Neoproterozoic	2,747 ± 2	Galarza et al. (2001)
			Igarapé Cigarra	Banded iron formations, mafic volcanic rocks		Neoproterozoic	2,747 ± 1	Macambira (2003)
		Grão Pará	Carajás	Banded iron formation		Neoproterozoic	2,759 ± 2	Machado et al. (1991)
			Paranapebas	Felsic and mafic volcanic rocks		Neoproterozoic		
Anderinhas	Pojuca Salobo		Greenstone belt		Neoproterozoic	2,761 ± 3	Machado et al. (1991)	
	Açuí		Quartzite, phyllite, mafic and ultramafic rocks, felsic volcanic rocks, banded iron formations and clastic sedimentary rocks		Mesoproterozoic	< 2,943 ± 18	Pidgeon et al. (2000)	
	Rio Novo							
	Sapucaia							
	Tapirapé							
Xingu Complex					Mesoproterozoic	2,851 ± 4	Machado et al. (1991)	
Pium Complex			Gnaiss, migmatite, granulite and amphibolite		Mesoproterozoic	3,002±14	Pidgeon et al. (2000)	
Intrusive rocks	Dike	Gabbro			Eopaleozoic	500	Bizzi et al. (2003)	
	Dike	Basalt, andesite and riolite			Paleoproterozoic	1,800	Zuchetti (2007)	
	Anorogenic granite, Central Carajás Cigano type	Granite			Paleoproterozoic	1,880 ± 2	Machado et al. (1991)	
	Mafic suite, Santa Inês type	Gabbro			Paleoproterozoic		Araújo e Maia (1991)	
	Ultramafic suite, Cateté / Vermelho type	Ultramafic rocks			Paleoproterozoic	2,378±55	Macambira (1996)	
	Granitoid Velho Salobo type	Monzogranite			Paleoproterozoic	2,573±2	Machado et al. (1991)	
	Granitoid suite, Plaquê Estrela/Planalto type	Granodiorite, monzogranite and sienogranite			Neoproterozoic	2,736±24	Avelar et al. (1999)	
	Mafic-ultramafic layered complex, Luanga type	Ultramafic rocks			Neoproterozoic	2,763±6	Machado et al. (1991)	

	Structural lineaments		Syncline		Dextral shear zone
	Sinistral shear zone		Study area		

Fig. 3: A) Regional geological map modified from Bizzi *et al.* (2003) based on Macambira (2003), Pereira (2009) and on interpretations from magnetometric and gamma-ray spectrometric data. B): Legend and chrono-litho-stratigraphic column of part of Carajás domain (Modified from Macambira, 2003; Bizzi *et al.*, 2003; Zuchetti, 2007; Pereira, 2009).



The main structure of Serra dos Carajás was originally described as a failed synclinorium with WNW-ESE axis (Fig. 6-3), whose sides are formed by iron formations interlayered by mafic volcanic rocks (Tolbert et al., 1971; Beisegel et al., 1973).

Araújo et al. (1988) and Araújo and Maia (1991) define Shear Belt Itacaiúnas as the main PMC structure. With main orientation E-W, this belt would be formed, in the northern region, by Serra dos Carajás and Cinzento transcurrent systems and in the southern portion, by an imbricated domain (Figure 6-3). Serra dos Carajás system, which involves primarily Grão Pará Group rocks, would correspond to a large sigmoid elongated in the WNW-ESE direction and limited by North and South mountain ranges. Its internal structure is interpreted by authors as a positive flower, produced by a sinistral binary shear zone. Cinzento System, which affects Salobo Group, Águas Claras, Xingu Complex and Gnaiss Estrela rocks involves iron ore bodies from Serra Norte (called N1 to N9) and Serra Leste. The imbricated domain, which extends from the southern edge of Serra dos Carajás to the region changing to Rio Maria granite-greenstone terrains, was developed over rocks of Xingu Complex, isolated granitoids and supracrustal lenses (Bizzi et al., 2003).

Pinheiro (1997) proposes for this PMC region a tectonic evolution that begins with the action of a ductile sinistral transpressive regime that affected the basement in the so-called Itacaiúnas Shear Zone around 2.8 Ga. Subsequently, the region would have undergone a second sinistral transpressive event, which caused the deformation and the metamorphism of Igarapé Pojuca Group rocks. An extensive intracratonic basin was formed around 2.7 Ga., where the deposition and volcanism observed at Grão Pará Group should have occurred. Around 2.6 Ga. a dextral transtrative tectonism would have affected all units and caused the development of Carajás and Cinzento transcurrent systems, as well as the nucleation of Carajás Fault. In the Paleoproterozoic era (between 2.6 and 1.9 Ga.) a sinistral transpressive reactivation of Carajás Fault would have caused the partial inversion of the system.

According to Rosière et al. (2005), an analysis of the structures in macro and meso scales in the PMC region indicates a superimposition of events, which considering

the existing data so far, detail and regional structural investigation, based on remote sensing data, postulate that the main structure of the province consists of a set of regional folds with axial trace WNW-ESE, truncated by regional brittle-ductile shear zones.

## Materials and methods

In this work we used databases of Full Tensor Gravity Gradiometry (3D-FTG) airborne geophysical, magnetometric and gamma-spectrometric surveys. As auxiliary databases were used geological maps, density data, drilling data, as well as Laser Imaging Detection and Ranging (LIDAR) aerial survey data that formed the digital elevation models (DEM).

### *Gravitric gradiometry*

The 3D-FTG aerial survey covered an area of 276 km<sup>2</sup> (12Km x 23Km), by performing 79 flight lines, covering open areas with lateritic coverages and rocky outcrop vegetation in the clearings named N3, N4, N5, N6, N7, N8 and N9. The aerial survey was conducted in the direction N25W, with 150m flight altitude over the ground and line spacing of 150m.

The direction of flight lines was set so that it tentatively stayed aligned with the major Serra Norte physiographic features, ensuring less interference of the relief in data acquisition, as suggested by Braga et al. (2009).

The 3D FTG system (Figure 6-4) is a mobile platform, inserted in an aircraft capsule and consists of 12 accelerometers equally arranged in three gravity gradient instruments (IGG) which measure the five independent components of the gravity gradient,  $t_{xy}$ ,  $t_{xz}$ ,  $T_{yz}$ ,  $T_{zz}$ ,  $T_{xx}$  or  $T_{yy}$  and represent the variation rate of components  $G_x$ ,  $G_y$  and  $G_z$ , which in turn represent the gravity acceleration along the Cartesian axes (Murphy, 2004; Galbiatti et al., 2011).

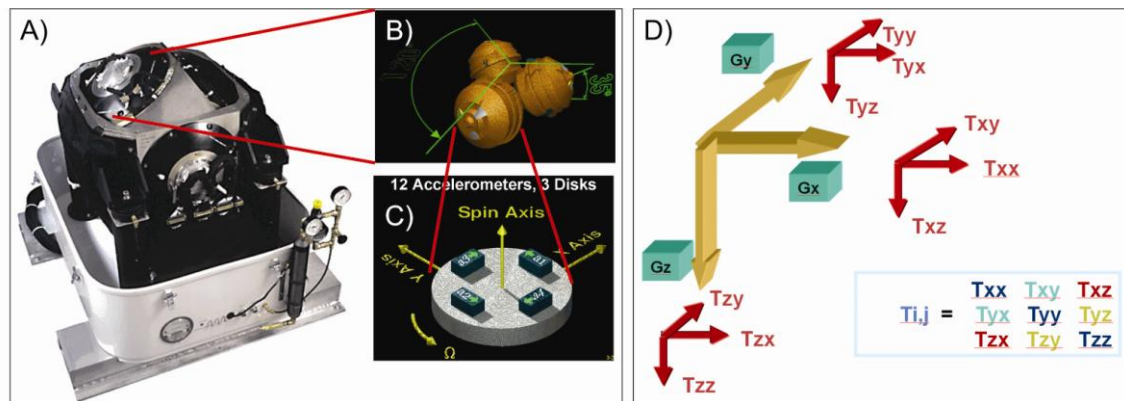


Fig. 4 The 3D-FTG system, showing: A) Capsule; B) IGG's; C) Accelerometers; D) Gravity gradient components in the direction of the three Cartesian axes (Modified from Murphy, 2004).

The data acquired in the 3D-FTG aerial survey have gone through a leveling process, tensor noise reduction and topographic correction. Topographic correction is important to reduce the effect of physiographic features in the signal coming from the geological features. The company that made the aerial survey and Vale SA both have proprietary methodology for relief correction, using grids modeling and 3-D prisms (Mataragio et al., 2011).

For the area of this aerial survey a density of  $2.67 \text{ g/cm}^3$  showed the best result to eliminate the physiography effect in free air measured data. Thus, were generated grids for all components of the gravimetric gradient so that evaluation and interpretation could be made. According to the procedure suggested by Pedersen & Rasmussen (1990), modified by Murphy (2007), invariants were generated using horizontal components in order to emphasize the high frequencies that have a greater confidence with the geological mapping.

Additionally, 3D inversion of 3D-FTG airborne survey data was used in this work according to the methodology of Li & Oldenburg (1998), adapted by Li (2001) for gravity gradient data, being targets N3, N6 and N8 selected as test areas. To reverse the gravimetric gradient of component  $T_{zz}$  was built a cuboidal mass with a suitable size for each body, placing cells beyond the data area of each model to avoid edge effects. As input parameter we used a reference model equal to zero. For the upper and lower density limits were used  $4.0 \text{ g/cm}^3$  and  $2.8 \text{ g/cm}^3$ , respectively, to cover the density values range expected for friable hematitites found in Carajás.

As quality control for the inversion model we made a comparison between the data observed and that calculated by the model. Figure 6-5 shows two ways of viewing this comparison, the first one is by using the profiles of the lines observed and calculated and the other is by means of continuous surfaces created based on the data observed and calculated. We can observe that in the example shown, the model could rebuild the signal of longer wavelengths, which is considered a good adjustment.

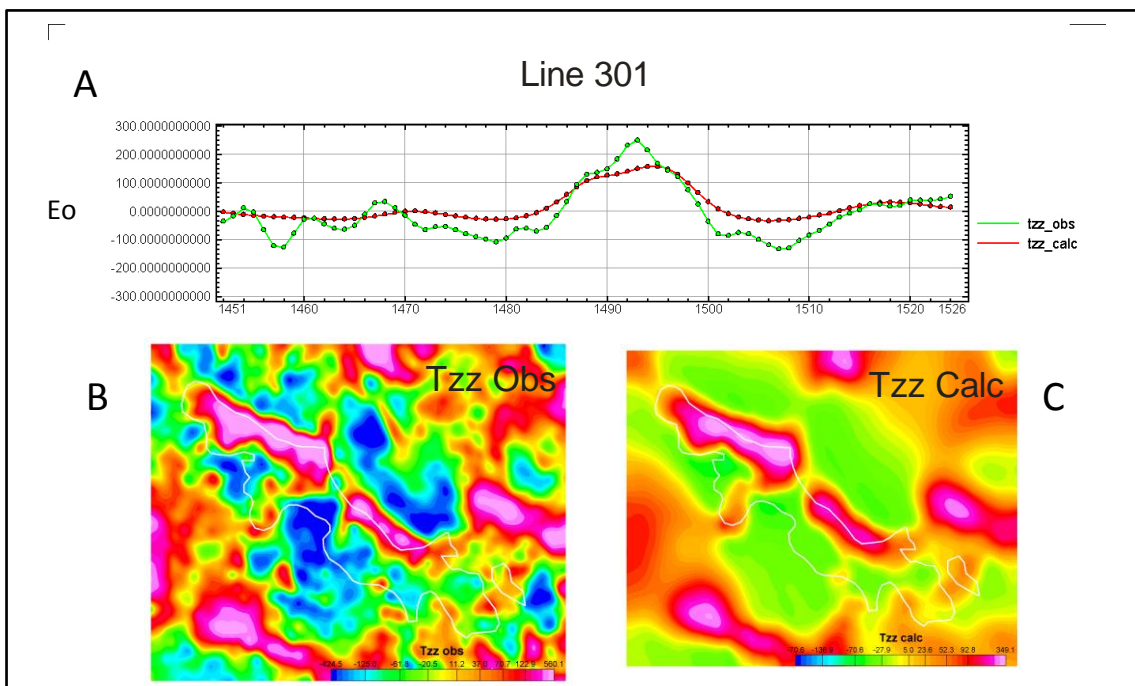


Fig. 5: Solutions for quality control of inversion models obtained from 3D-FTG data. A) Profiles of the observed and calculated values of the Tzz gravimetric gradient component. Eotvos (Eo) Scale; B) Grid of the Tzz component observed; C) Grid of the component Tzz calculated.

Murphy (2004) with his observations and the theoretical model representing the response of each gravity gradient component for an ideal target has demonstrated that component Tzz enhances the anomalous body, while the other components enhance the edges of the anomalous body, and components Txx and Txz enhance the edges in the N-S direction, and components Tyy and Tyz enhance the edges in the E-W direction. Through this edge enhancement structural lineaments are highlighted, which demonstrates it is a useful tool for the structural analysis. The magnitude of components Txx and Tyy can also be used to investigate the thickness of the targets. With these considerations, we analyzed the edge enhancement of each component of the



gravimetric gradient in relation to the bodies with direction N-S, E-W, NE-SW and NW-SE (Figure 6-7) and thus provide structural lineaments with greater confidence as to their positioning.

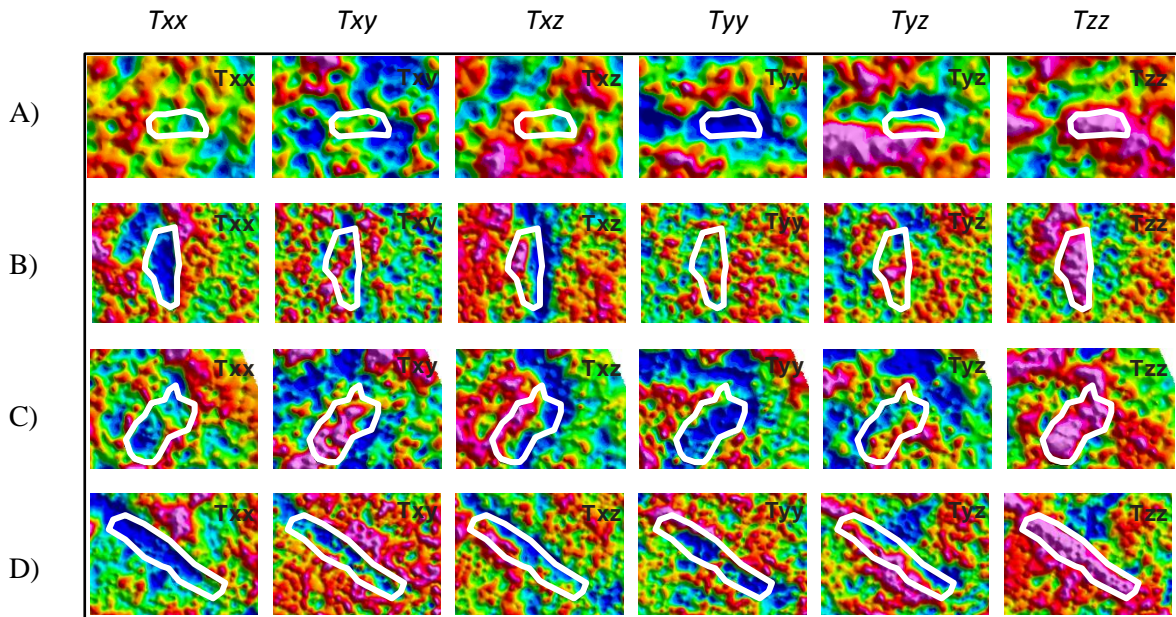


Fig. 6: Response of each component in relation to the geometry of the target, A) Target in E-W direction; B) Target in N-S direction; C) Target in NE-SW direction; and D) Target in NW-SE direction.

### Magnetometry

The magnetometric aerial survey was conducted simultaneously with the 3D-FTG airborne survey, thus having the same features of spacing and height of flight. The airborne-magnetometer system used is constituted by an optical pumping sensor of caesium vapor, model Scintrex CS-2 with a sensitivity of 0.001 nT. The sampling rate was 10 Hz, producing one measured every 7m with readings of the compensated and gross magnetic field values.

To enhance the data observed we made an interpolation using a minimum curvature algorithm with 50m cell size of the anomalous magnetic field and thereafter a linear transformation to observe the amplitude of the analytic signal calculated based on the equation suggested by Roest et al. (1992).

Bu using power spectrum, we could observe the distribution of the depths of anomalous sources, indicating a depth of 250 meters as modal, which is quite consistent with that expected for the iron formations in this area.

### *Gamma-spectrometry*

A gamma-spectrometric airborne survey was conducted in the direction N15E with flight height of 150m of the ground and 250m spacing between lines, being the area covered by two distinct steps of aerial survey. The segments of 113 lines were needed to cover the polygon of this work. We used a Cessna-Grand Caravan aircraft equipped with gamma-spectrometer EXPLORANIUM, model GR-280, with 256 channels, and a 1Hz interval between measurements, i.e. one measurement every 70 m.

To enhance the data were used interpolation grids with a minimum curvature algorithm of the total count (TC), of radioelements K, eTh and eU and ratios eTh/K, eU/eTh and eU/K. To highlight lateritic and colluvium coverages of iron formations (Boyle, 1982; Wildford et al., 1997; Zacchi et al., 2010) were also generated ternary images of radioelements and of ratios among radioelements. Another technique used was the determination of F factor (Efimov, 1978), with the aim of identifying K enriched areas, in relation to ratio eU/eTh, which may be related to hydrothermal alteration zones, as suggested by Prichystal and Gnojeck (1985).

### *Density samples*

As references of lithotype densities were used samples gathered over the years which give support to the estimates of Serra Norte iron ore project mineral resources. Altogether were used data from 973 density measurements.

### *Drilling data*

This Serra Norte region has drilling measurements dating back to the 1960s, when mineral exploration works in Carajás started. The database includes 2,526 rotary/diamond drill holes, with location data (XYZ) in the Collar file, borehole deviation data in the Survey file and visual lithological characterization data interpreted with the results of chemical analyzes in the Assay file.

Drilling data were processed to produce three-dimensional voxels model of lithotypes intercepted in the drilling (Figure 6-8 and Figure 6-9). This study used the minimum curvature methodology to generate voxels with 25m of side. Through the voxels model of lithotypes we intend to establish links with the products of airborne geophysical data processing as a means of validating the interpretations made.

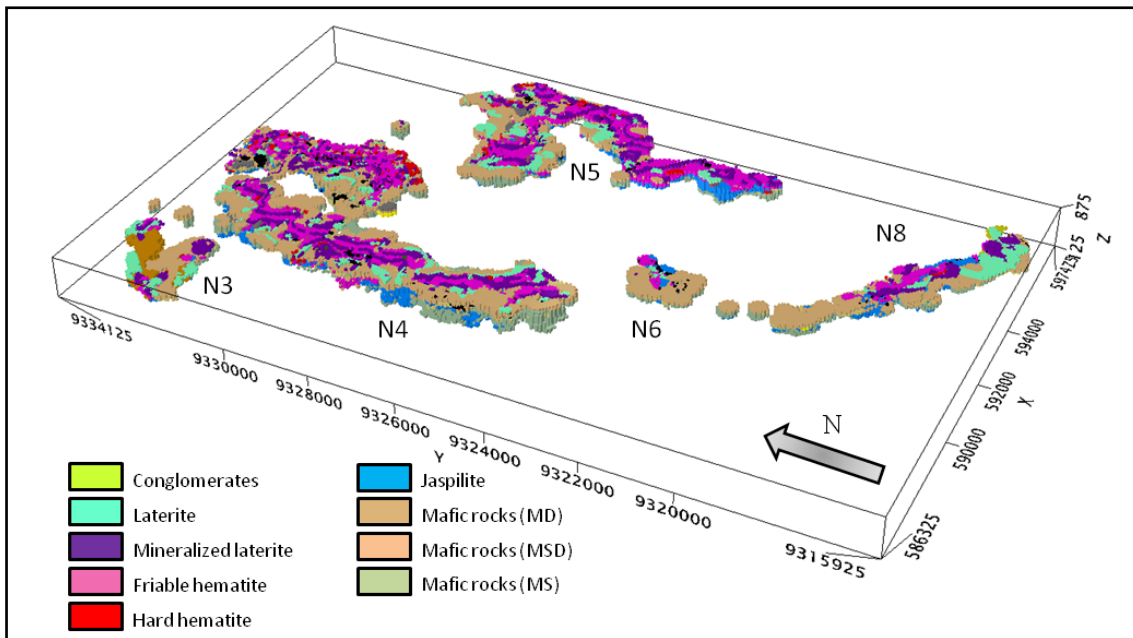


Fig. 7: Voxels model of the lithologies intercepted in Serra Norte drillholes.

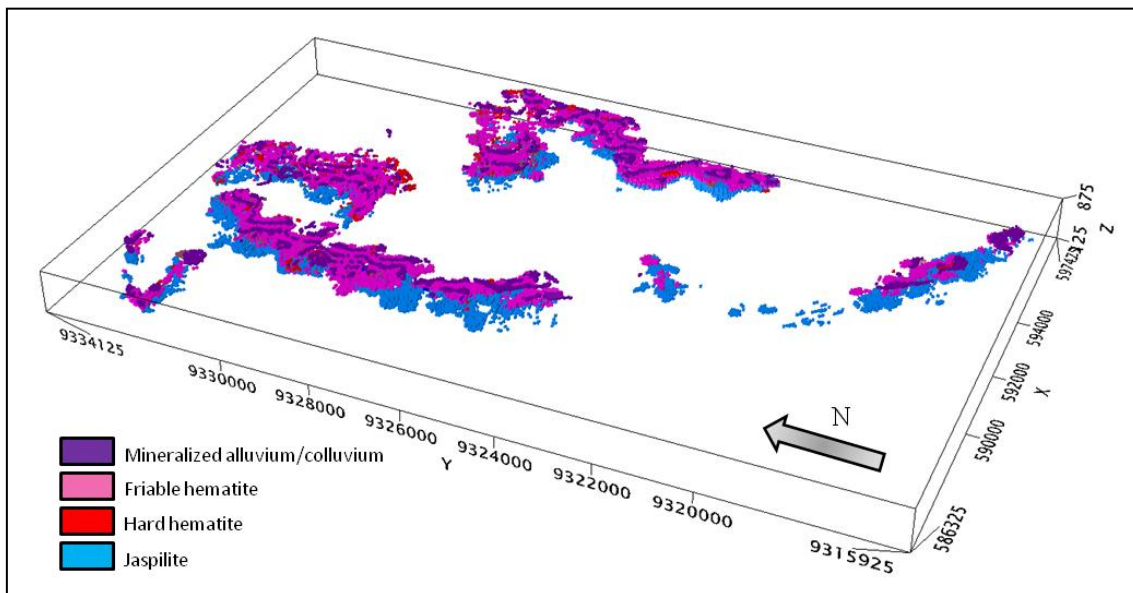


Fig. 8: Voxels model of iron formations in Serra Norte.

## Criteria for Defining Targets and the Integrated Exploratory Model

Among the major improvements made in recent years in the iron ore exploration is the use of geophysical techniques, including magnetometry, gravimetry, electrical methods and radiometry. Originally, the main geophysical method used in the exploration of iron ore was magnetometry, due to the presence of magnetite as ore mineral, which characterized magnetic anomalies as exploratory criteria. However, the predominance of hematite (nonmagnetic) in several deposits led to the need of using other geophysical methods in the exploration, such as airborne gradiometric gravimetry (Flis, 2008; Dalstra & Flis, 2008; Braga, 2009; Zacchi 2010).

A few iron ore exploration works using geophysical data have been recorded in Brazil, usually with iron formations being secondary targets in exploration models developed for other mineral goods. We highlight the works of Braga (2009) and Braga et al. (2009) that show a correlation between airborne magnetometry and airborne 3D-FTG gravimetric gradiometry data in iron ore prospection in Baú-Gandarela areas, in the Iron Quadrangle, and of Zacchi (2010) in the Southern Espinhaço region which presents an exploratory model with data derived from geophysical products obtained with Spectrem system.

Based on the processed products and the enhancement of geophysical airborne surveys data (3D-FTG, magnetometry and gamma-spectrometry) we analyzed the main indicators for defining iron ore targets and the enhancements of best suited data. In this process were used databases of existing geologic maps, databases of several drilling campaigns and data of field walks, in order to validate the analyzes and interpretations made. In mining areas a mask was used so that the intense movement of masses and the complete mischaracterization of the original terrain would not interfere in the analyzes and interpretations.

While preparing an exploration model based on airborne geophysical data and its integration with multisource data, the approach used should consist of processing and enhancement of data, with emphasis on the geologic environment, since in exploratory models we should not limit our observations to geophysical anomalies, but also consider



the answers related to mineralization, lithology and structures with economic importance. Moreover, classical methods such as the interpretation of two-dimensional maps do not answer to all questions and to the selection of potential targets. The best way of optimizing the analysis is by completing the framework produced using geophysical inversions and integration of three-dimensional data. For a better geophysical-geological understanding and correlation, the main rock types mapped within the drilling database as well as the data from field studies were grouped according to the criteria used in the geological modeling process for estimating resources, provided by Vale SA which operates in the Serra Norte study area (Table 6-1).

**Table 8-1:** Most frequent lithotypes in Serra Norte and its main characteristics.

Lithotype	Description	Usual nomenclature	Acronym
Sterile lateritic coverage	Fills the top of plateaus marking the old planing horizon of Carajás province, covering the regolith of mafic rocks, or associated with mature and cemented colluvium deposits. Has coloform structure and high porosity.	Chemical canga	CQ
Mineralized lateritic coverage	Colluvium and/or eluvial deposits on <i>in situ</i> ore outcrops. Thickness may reach more than 20m. It has a high content of Fe and relatively low contaminants, which enables its potential use as ore. It is an indicator of iron ore occurrences.	Ore canga	CM
Friable hematite	Type of frankly friable iron ore, with high porosity and an average grade of 66% Fe. Color black to dark gray, sometimes reddish due to the alteration to goethite. The banding inherited from jaspilite is partially to completely obliterated due to leaching of jasper/chalcedony/carbonate levels.	Friable hematite	HF
Compact hematite	Type of compact ore generated from goethite cementation when associated with lateritization processes and locally by hydrothermal fluids, when associated with tectonic structures. Color varying from black to reddish brown. Porosity is high and Fe contents are between 60.15% and 68.09%.	Compact hematite	HC
Magnetite hematite	Type Fe rich ore with Mn contents above 2%, usually located at the base of hematite bodies, likely to be a leached Mn accumulation zone of the weathered horizon.	Magnetite hematite	HMN
Aluminous hematite	Type of ore with iron contents above 55% and alumina contents above 3%, normally present on top of the iron formation.	Aluminous hematite	HAL
Iron Manganese	Partially weathered manganese enriched jaspilite.	Iron Manganese	FMN
Jaspilite	Banded iron formation (BIF) compact with centimetric to millimetric laminations among very fine grained jasper/chalcedony/carbonate and magnetite/martite levels. Represents protore in the region, with iron concentrations between 20% and 40%.	Jaspilite	JP
Strongly weathered regolith	Regolith of mafic rocks, with complete loss of the protolith original structure. Its depth is directly related to the weathering level.	Decomposed mafic rock	MD
Partially weathered regolith	Regolith of mafic rocks showing relicts of the protolith original plot, but with a deep mineralogical transformation.	Semi-decomposed mafic rock	MSD
Mafic rocks	Basalts, gabbros and diabbases little to not affected by weathering, systematically chloritized. Color dark green, sometimes with volcanic structures as typical tonsils filled by quartz, carbonates and chlorites and eventually by sulfides.	Unweathered mafic rock	MS
Arenite	Solid sedimentary rock white in color, consisting mainly of quartz grains and arcosean matrix.	Arenite	AET
Conglomerate	Clastic sedimentary rock of psammitic character, whitish to yellowish in color, consisting mainly of angular to sub-rounded fragments of quartzite, jaspilite, cherts and mafic volcanic rocks.	Conglomerate	CGL
Pelites/Siltites	Fine-grained sedimentary rock consisting of silt and clay layers locally mottled.	Pelite/Siltite	AGT

The joint qualitative interpretation of all gamma-spectrometric images produced for this project was carried out in Geographic Information System (GIS) environment, using ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012).

The analysis of K, eU and eTh content of the bodies mapped was based on analysis of the responses of individual channels, the compositions in RGB and CMY false color, as well as in the combined compositions with the digital model of the terrain generated by airborne geophysical and LIDAR data.

In individual channels, K, eU, eTh contents were analyzed based on false color image. The procedures adopted for interpreting gamma-ray spectrometric data are summarized as follows: (i) comparison of the image corresponding to each discriminated channel (K, eU, and eTh) with the topography, to study the influence of the relief on these data; (ii) analysis of the total count channel to define large gamma-ray spectrometric areas, as well as the analysis of the relative contribution of each of the other channels; (iii) use of false color (ternary image) compositions of RBG and CMY types with K, eU and eTh channels, adding or not the digital terrain model as a fourth component and its spatial study to define units and/or areas with similar gamma-spectrometric signatures. To this data was added the parameter F image (Efimov, 1978). Parameter F technique (Efimov, 1978) is an attempt to distinguish a hydrothermal enrichment of K in relation to geological background information, i.e. lithological variations of the environment. This parameter consists in the K abundance relation associated with eTh/U ratio and in the eU abundance related to eTh/K ratio.

In iron ore prospecting, normally gamma-ray spectrometric data are mostly used for mapping geological units associated with iron formations than directly to determining its occurrence (Flis, 2008). This is due to the low natural concentration of these elements in iron formations. In Brazil, the low values of radioelements tend to stand out as well as the association with lateritic plateaus.

In this study area, the analysis of products derived from gamma-ray spectrometric data allowed individualizing signatures associated with outcropping iron

formation, associated to Carajás Formation, through low levels of K, eU and eTh radioelements which show a high correlation with outcrops mapped by Resende and Barbosa (1972). The regolith signature associated with this unit shows eTh enriched plateaus. However, lateritic coverages associated with mafic rocks - host rocks of the mineralization associated with Parauapebas and Igarapé Cigarra formations - are eTh and eU enriched. Clastic sedimentary rocks such as sandstones and conglomerates of arcosean matrix which cover Grão Pará Group are mapped with high levels of K and were correlated with Gorotire and Águas Claras Formation units (Figure 6-10).

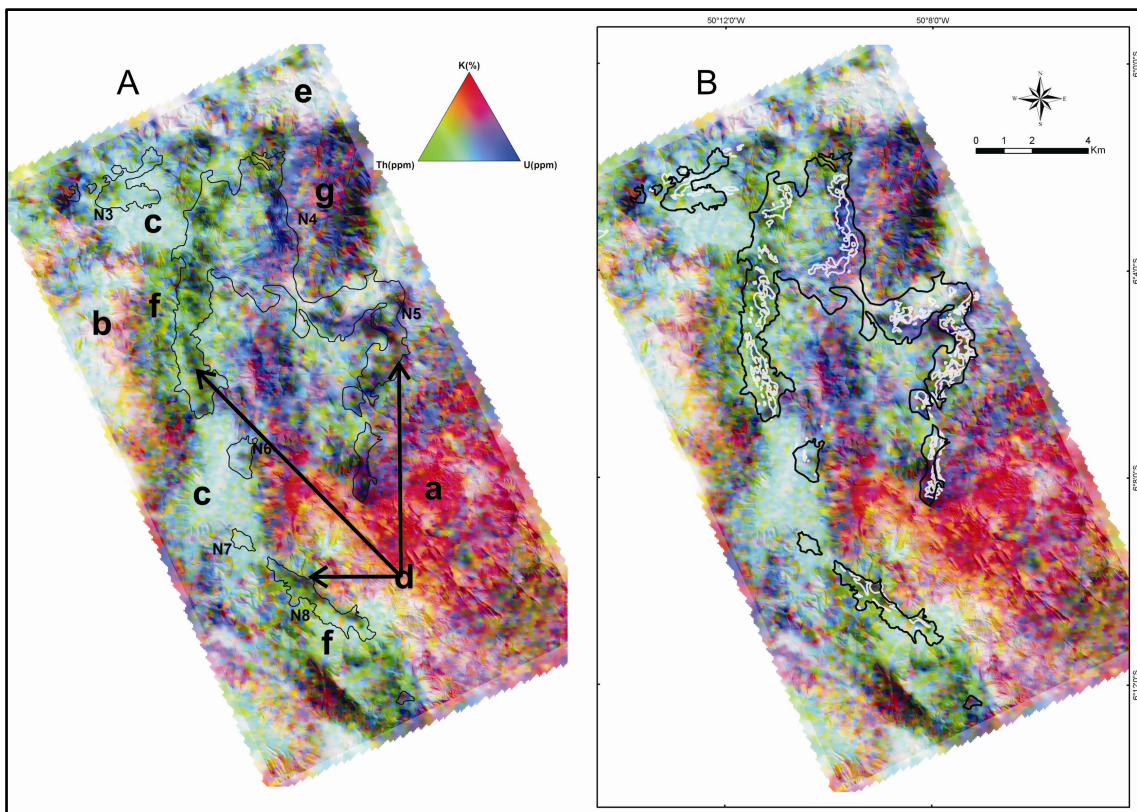


Fig. 9: A) RGB colored composition of K, eTh and eU radioelements, showing: a) Conglomerates of Gorotire Formation; b) Sandstones of Águas Claras Formation; c) Sterile lateritic coverages over mafic rocks; d) Outcrops of iron formations and mineralized laterites; e) Serra dos Carajás Granite; f) Mafic rocks of Igarapé Cigarra Formation; g) Mafic rocks of Parauapebas Formation; B) Polygons in white show iron formation outcrops mapped by Resende and Barbosa (1972) on the RGB colored composition (KThU).

Total count also highlights outcropping iron formations which are related to low scores on plateaus, while lateritic covers on the plateaus are consistent with the high scores. Areas with high K are correlated to sedimentary rocks with arcosean matrix, as occurs with conglomerates and sandstones of Gorotire Formation. Anomalies indicated by the F-factor and high eU values are consistent with the alignment NE-SW direction that cuts the central portion, which may be related to hydrothermal fluids conduits and be the justification for the potassium alteration observed in N5 gabbros.

### *Magnetometry*

The analysis of the anomalous magnetic field relief was aided by its linear transformations, mainly with: (i) the amplitude of the analytic signal, determining the position of magnetic sources, (ii) the magnitude of the total horizontal gradient, (iii) the first vertical derivative. The use of derivatives, specially the vertical ones, helped understanding the relative spatial positions of the sources, while the horizontal derivatives helped plotting them in the maps. We made a correlation and integration with the local geology available in the literature and with geological maps at 1:20,000 scale.

The assessment of airborne magnetic data allowed identifying magnetic features and interesting structures under the prospective point of view. We observed that mineralized bodies with high Fe content are not mapped or have a low gradient in the analytic signal amplitude, since they are rich in hematite and martites and poor in magnetite. Through analysis of products derived from magnetic data, especially in the amplitude of the order zero analytic signal we noticed a correlation between the surface and subsurface iron formations with the anomalies observed due to the presence of magnetite and martite in mineral paragenesis present in the iron formations (Figure 6-11 and Figure 6-12).

The validation based on the geological data of boreholes and voxels model generated from the lithotypes intercepted in the drilling confirms this assumption and shows that magnetism is more associated with protore. Locally we can observe the loss of magnetism due to the oxidation present in iron ore (Macambira, 2003) (Figure 6-12).



The selection of favorable areas for iron ore prospection based on the comparison of airborne magnetometric survey and 3D-FTG data (Figure 6-13) shows that the features interpreted based on products derived from gradiometric gravimetry are more precise and enhance the envelopment of potential abnormalities, as well as the structural partitioning.

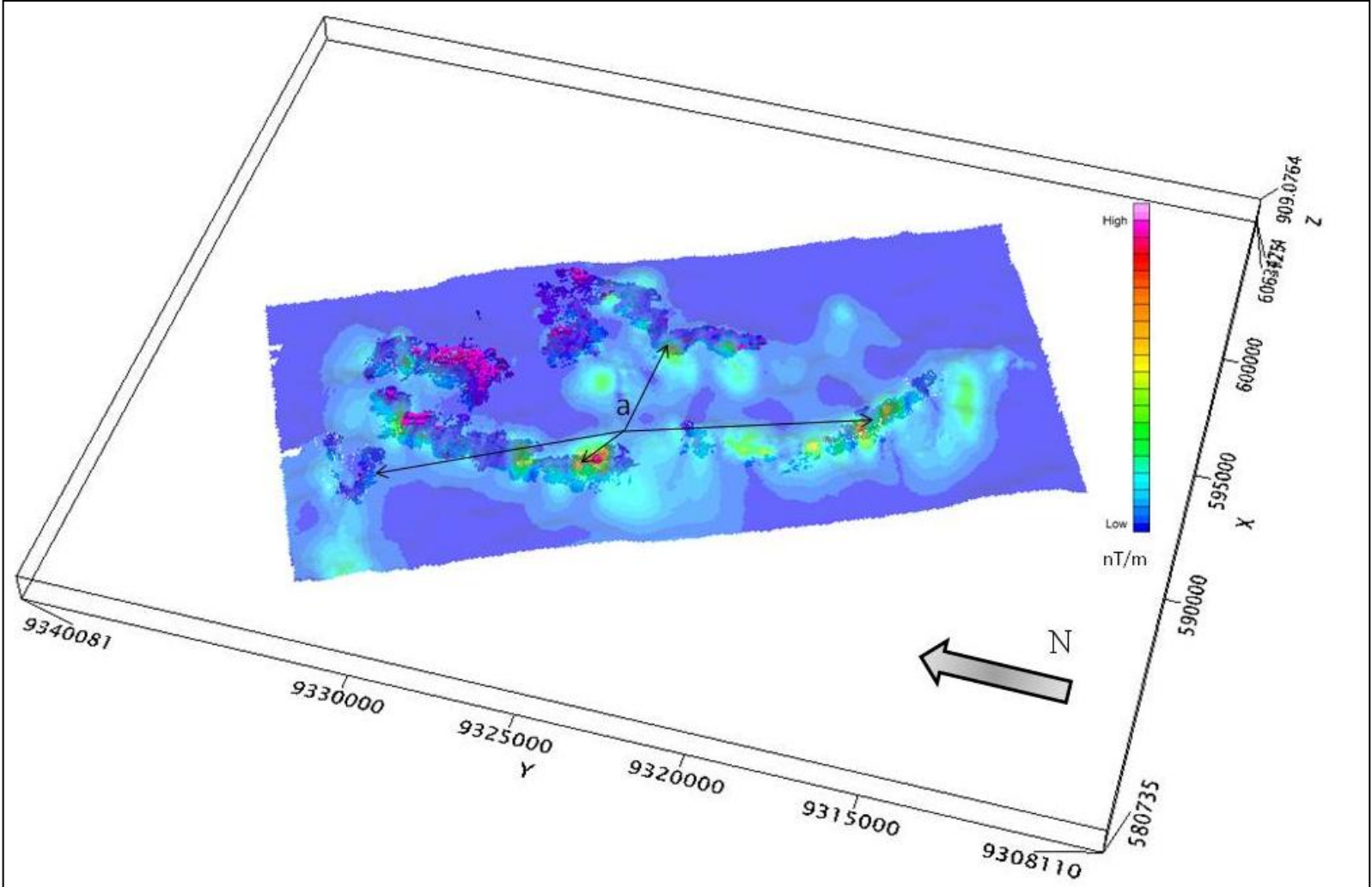


Fig. 10: Amplitude of the analytic signal, with linear color contrast on the *voxels* model (a) of iron formations characterized in boreholes.

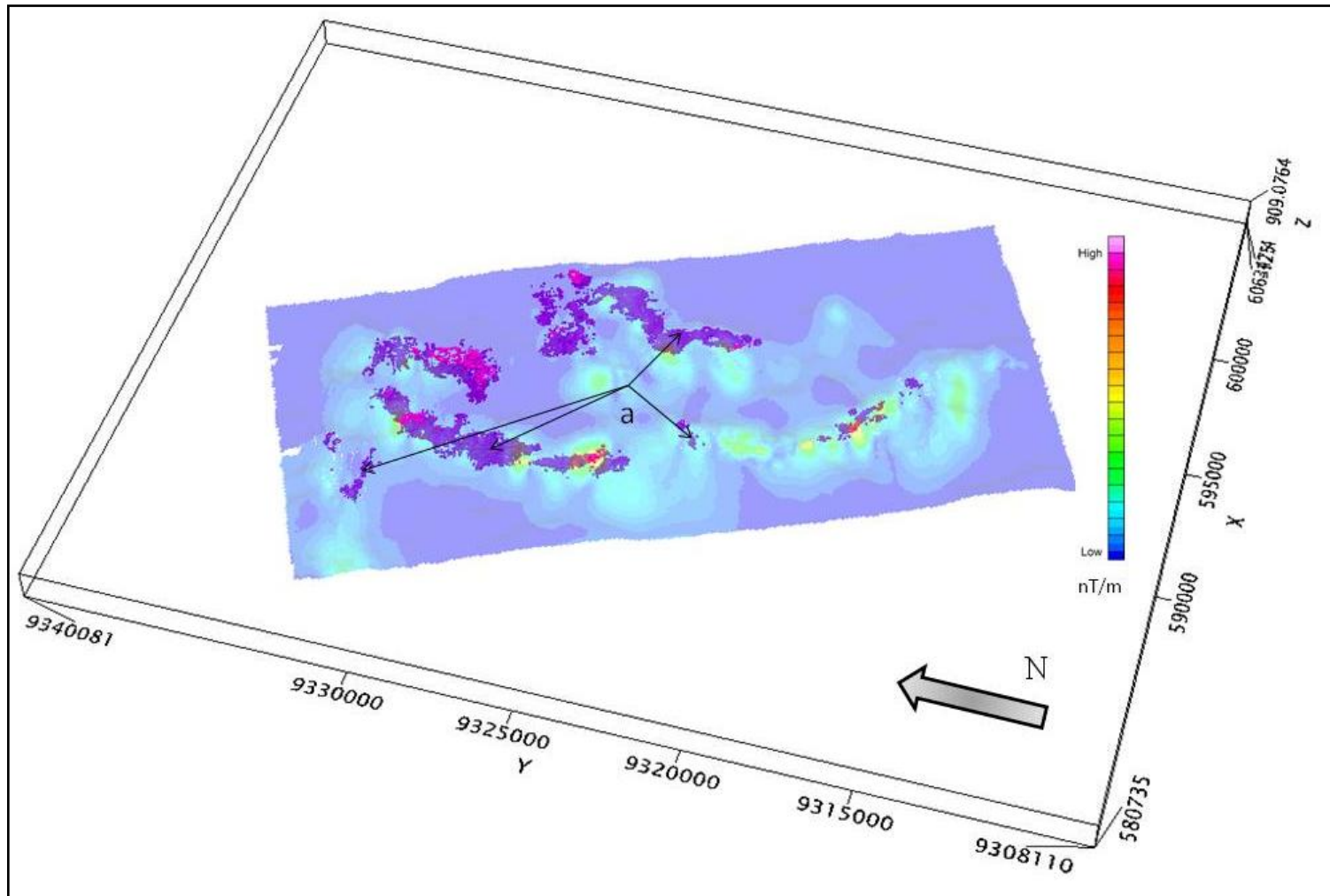


Fig. 11: Amplitude of the zero order analytical signal, showing in (a) occurrences of friable hematites displaced in relation to higher magnetometric gradients.

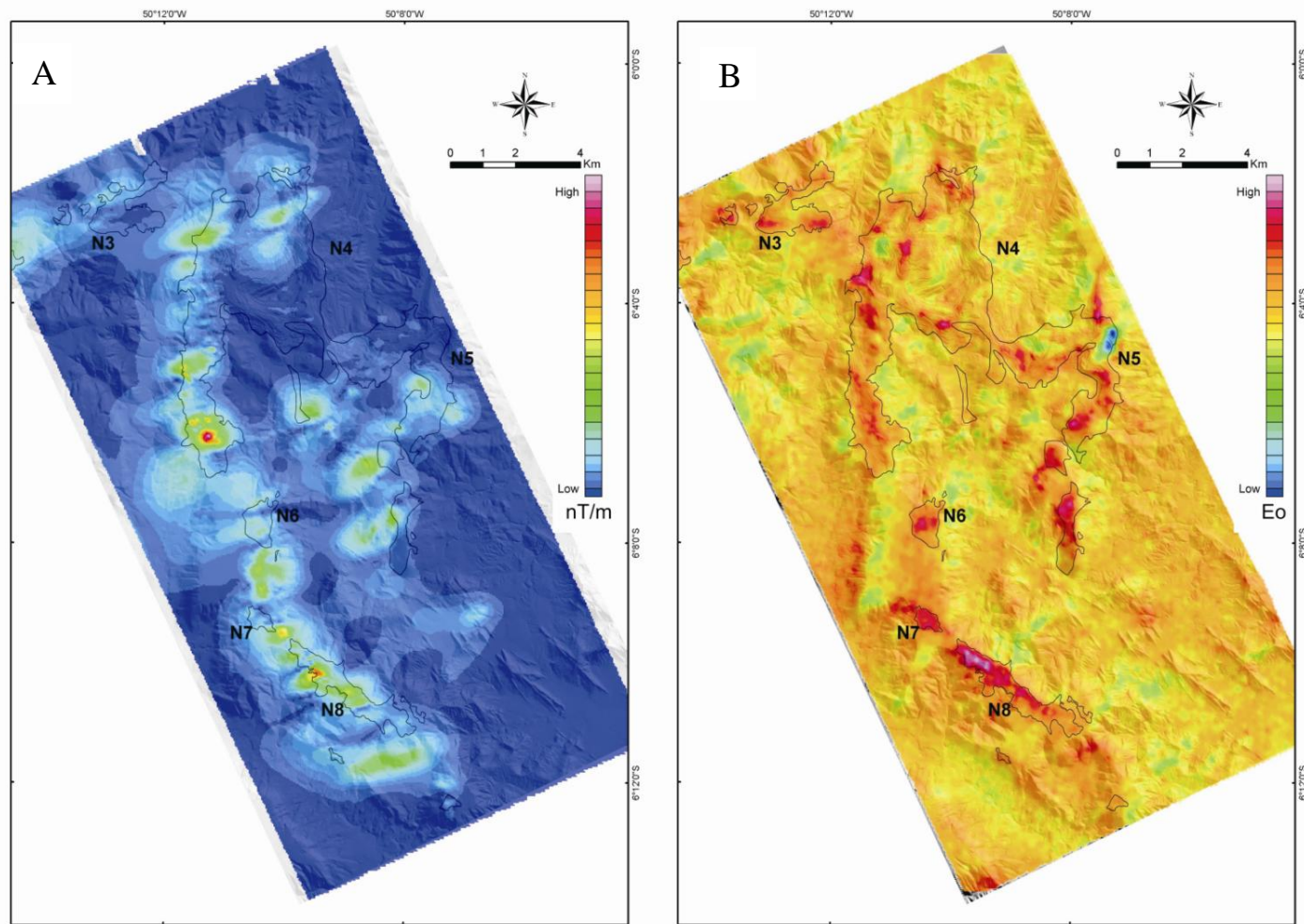


Fig. 12: A) Image of the amplitude of zero order analytic signal; B) Image of the Tzz gravimetric gradient component.



### Gravimetric gradiometry

Here is showed the characterization of iron ore through the analysis of two-dimensional maps, three-dimensional inversion and integration of data derived from the airborne gravimetric gradiometric 3D FTG survey.

To make the distinction between the lithotypes of the bedrock using airborne gravimetric gradiometric data, it is necessary to distinguish a contrast of densities. With this assumption and with prior knowledge of the densities of the main lithotypes in the studied area it was found that the Tzz component has high correlation between the data observed in the airborne survey and those collected in the field and in drilling campaigns made since the 1960s (Figure 6-14), since the density of iron formations has a clear contrast with the host rocks, as can be seen in Figure 6-15.

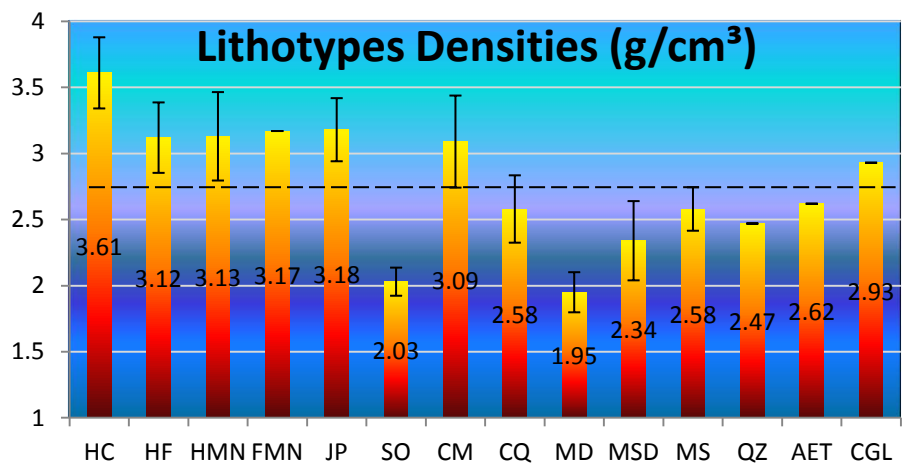


Fig. 13: Density data for Serra Norte collected in borehole and mining fronts, showing the contrast between iron formations and their host rocks.

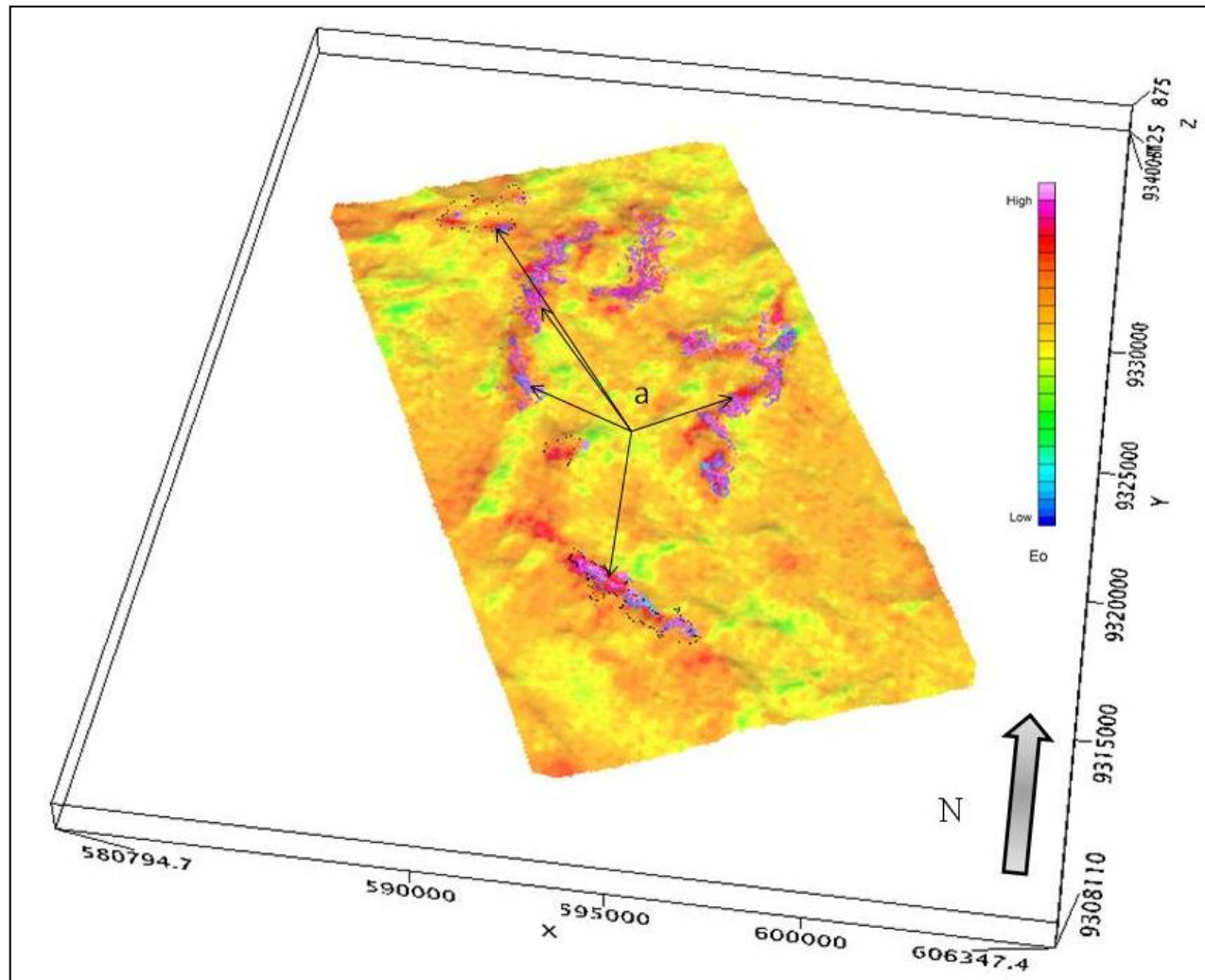


Fig. 14: Grid of Tzz component with linear color contrast, overlapping the *voxels* model of iron formations intersections, showing (a) the correlation between high gradients.

Vertical sections built using geological data of boreholes enhance the envelopment of high gravimetric gradients mapped in the Tzz component. We observed that the high gradients correspond to regions where iron formations, ores and protores (jaspilites) occur, which provides a high correlation between them. This observation is due to the relation of the values of gravimetric gradient with iron ore and protore which have clear density contrast with the host rocks and are outcropping to sub-outcropping, with depths ranging from the ground surface up to about 400m of depth (Figure 6-16, Figure 6-17 and Figure 6-18).

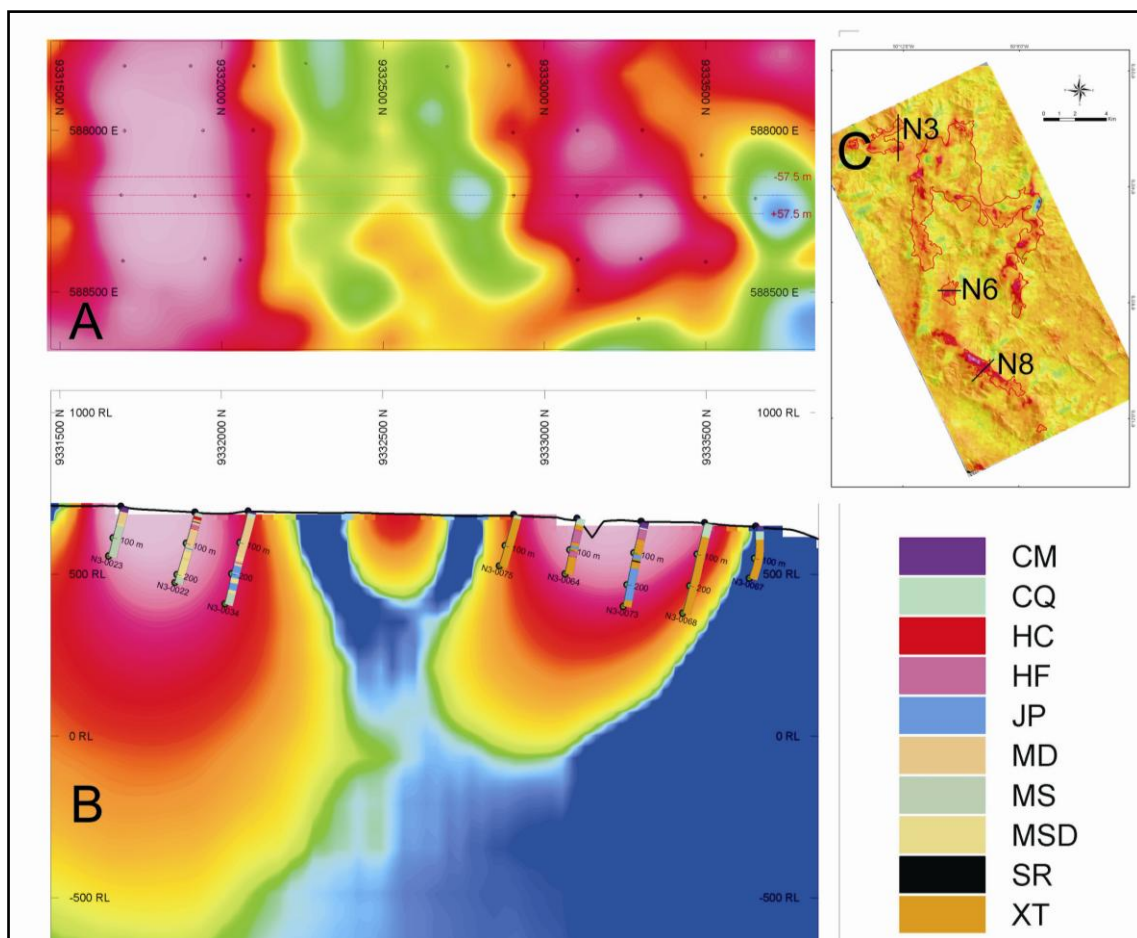


Fig. 15: A) Grid of Tzz component with the trace of vertical section, B) N3 vertical section showing the correlation between the envelope of the high gravimetric gradients arising from the inversion of 3D-FTG data and the intersections with iron formations (ore and protore); C) Location of N3 vertical section on the Tzz grid.

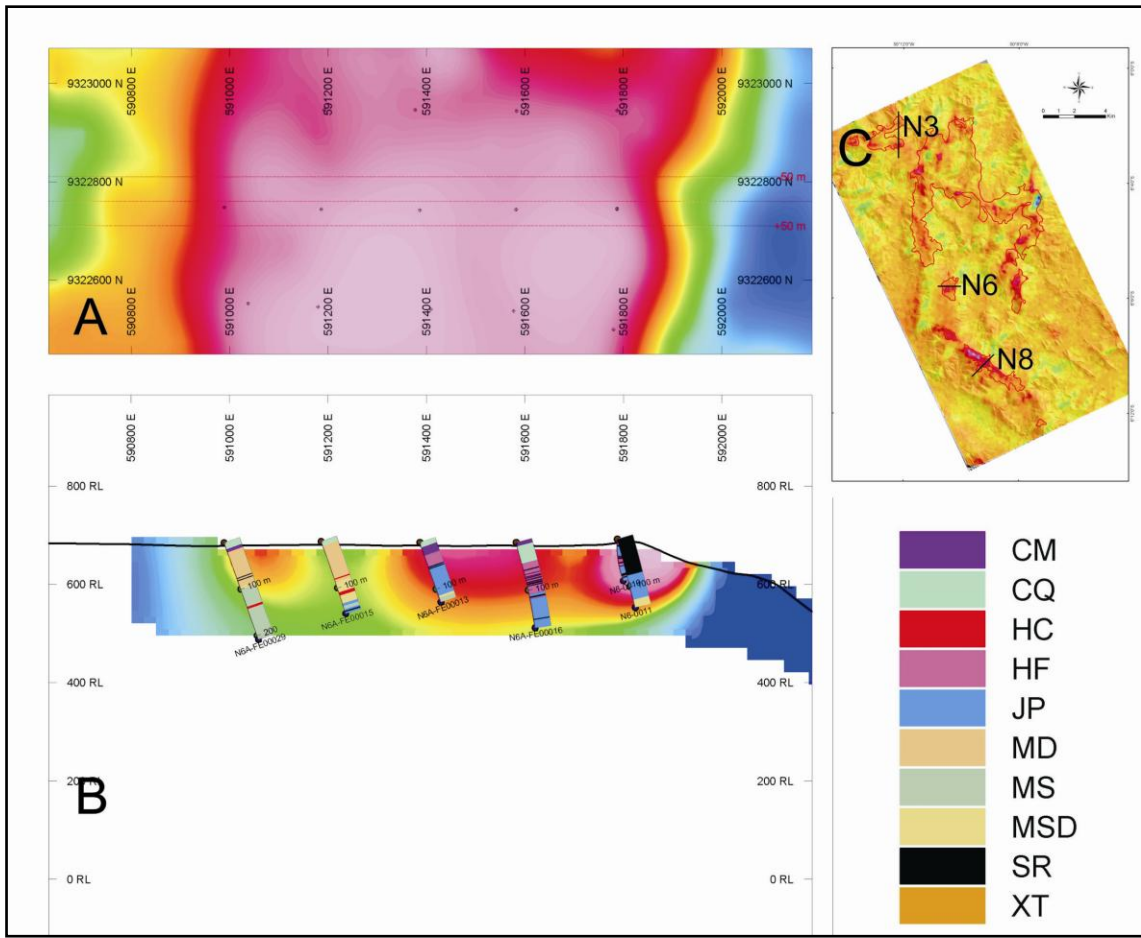


Fig. 16: A) Grid of Tzz component with the trace of vertical section, B) N6 vertical section showing the correlation between the envelope of the high gravimetric gradients arising from the inversion of 3D-FTG data and the intersections with iron formations (ore and protore); C) Location of N6 vertical section on the Tzz grid.



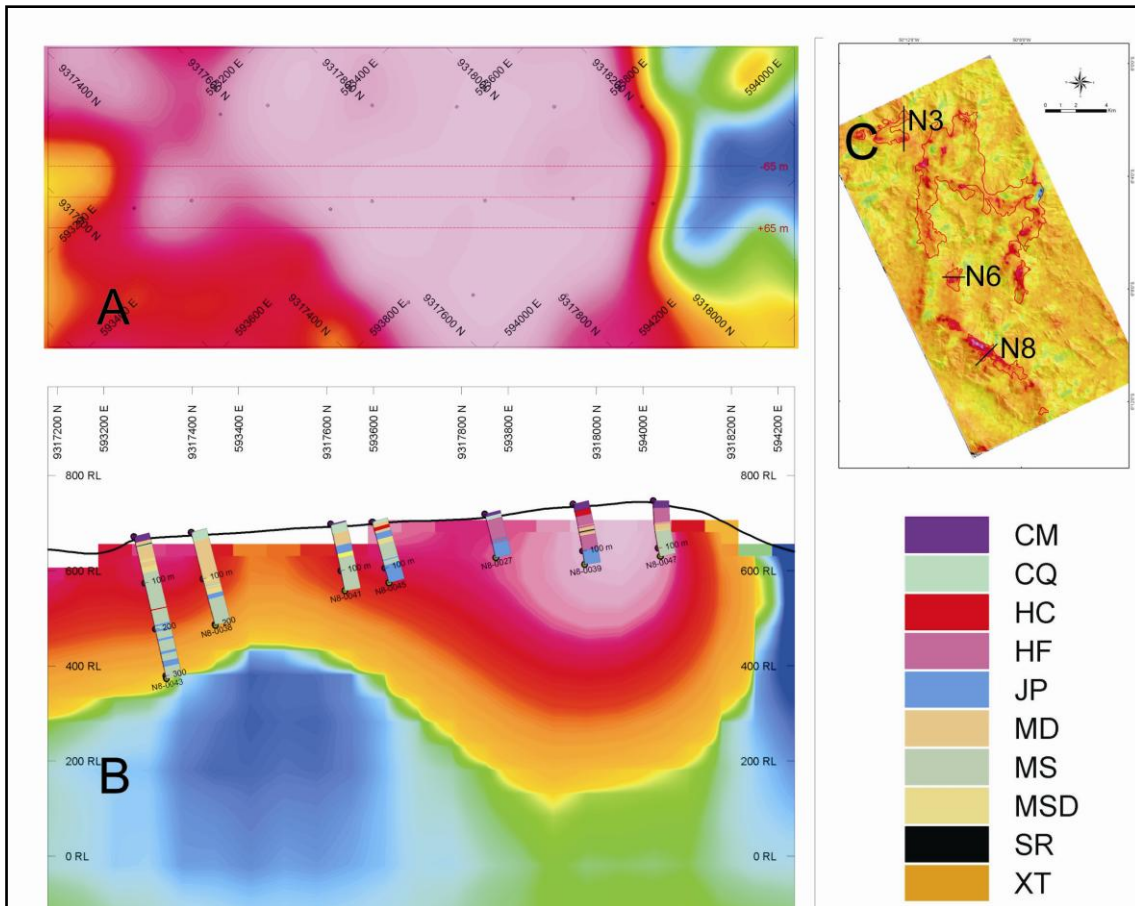
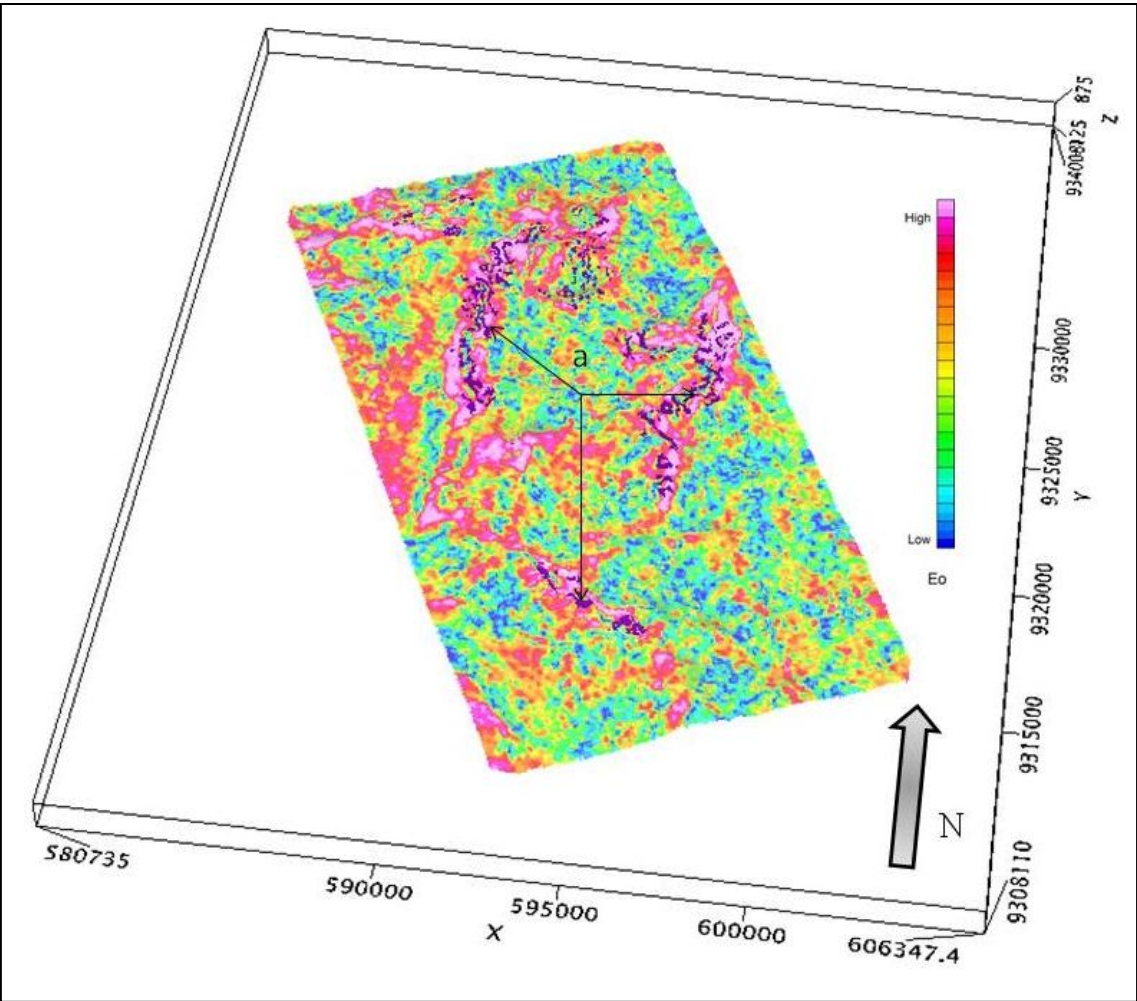


Fig. 17: A) Grid of Tzz component with the trace of vertical section; B) N8 vertical section showing the correlation between the envelope of the high gravimetric gradients arising from the inversion of 3D-FTG data and the intersections with iron formations (ore and protore); C) Location of N8 vertical section on the Tzz grid.

Products generated based on the calculation of the invariant ( $\text{InvarTxxTyy}$  and  $\text{InvarTxyTxxTyy}$ ), the product of gradients  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  and  $T_{zz}$  and the visualization of gradients using RGB system ( $T_{zz}T_{yy}T_{xx}$ ) show the enhancement of high gradients that map the outcrops and shallower portions of the iron formation. These products have proved to be useful in mapping and prioritizing targets for field verification steps. In Figure 6-19 we can observe  $\text{InvarTxxTyy}$  superimposed on a three-dimensional grid of iron formations generated based on drillholes.



**Fig. 18: Grid of invariant Invar TxzTyz showing (a) the low gradients correlated with mineralized laterite coverage (CM).**

Using components  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  and  $T_{yz}$  of the gravimetric gradient, we interpreted the structural framework of the studied area, since these components, as shown in Figure 6-7 (Response of each component in relation to the geometry of the target, A) Target in E-W direction; B) Target in N-S direction; C) Target in NE-SW direction; and D) Target in NW-SE direction.), highlight the limits of density contrasts related to the existing geological discontinuities. Using the structural data collected during field work and the existing geologic maps (Figure 6-20) we could validate the interpretation of the data. Generally, there are three families of structures that can be discriminated (Figure 6-21), the first with E-W trace, called  $S_n$ , which is parallel to the surface of the banding ( $S_b$ ); the second with NW-SE trace, here called  $S_{n+1}$  and the

third with NE-SW trace, called Sn+2. Cutting and overlapping criteria observed in the images were hierarchized with data collected during field work (Figure 6-22).

Sn+1 foliation is mapped in outcrops such as shear zones with metric width transposing Sn, while Sn+2 in iron formations is presented as a spaced cleavage. In the host rocks, Sn+2 are mapped as metric to decametric shear zones. These two structures exhibit directional and vertical components responsible for level and intertyping differences between the contacts of lithotypes and usually have a high dip-angle, which is characteristic of this type of structure. Both Resende and Barbosa (1972) and Macambira (2003) geological maps have characterized these structures, the first one focusing on the tops of the plateaus and the second on host rocks of iron formations, restricted to the N portion of the studied area.

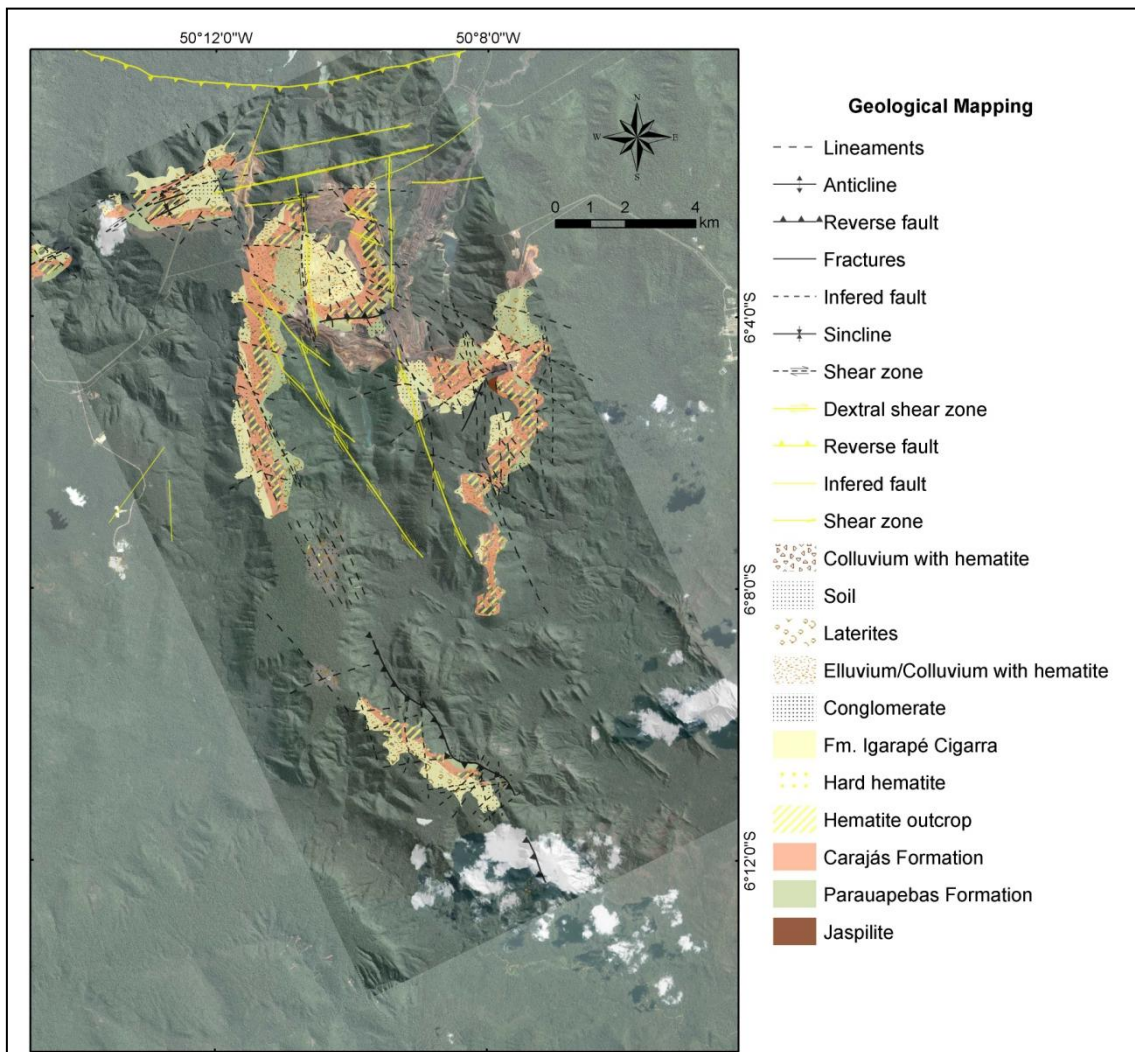


Fig. 19: Geological map with mesostructures interpreted by Resende and Barbosa (1972) by Macambira (2003) in red and in the portion N in yellow. Background formed with Ikonos images of 2007.



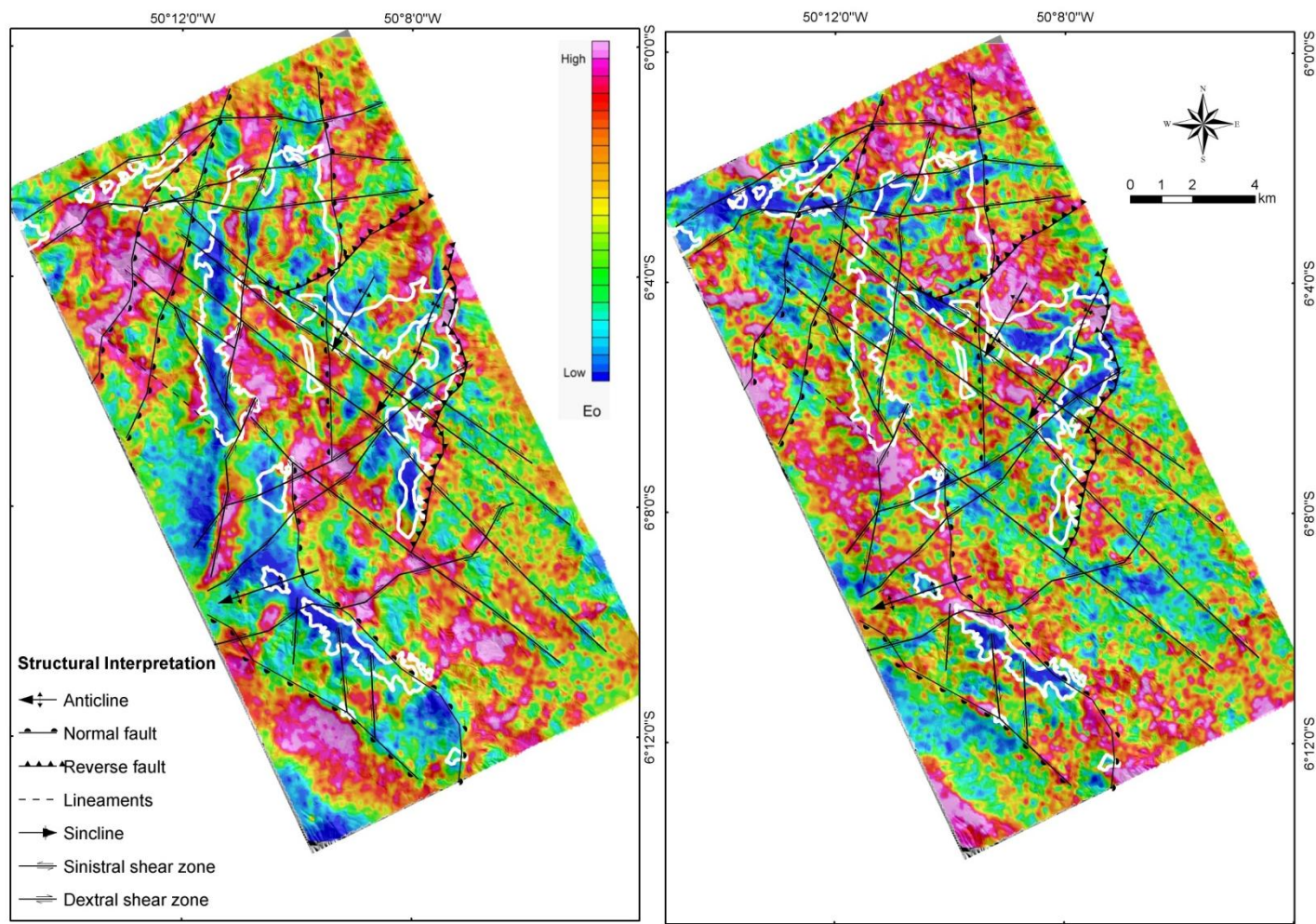


Fig. 20: Structural Interpretation of  $T_{xx}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yy}$  and  $T_{yz}$  components. A) Structural interpretation of the  $T_{yz}$  grid component, highlighting E-W structures; B) Structural Interpretation of  $T_{xz}$  grid component, highlighting N-S structures.



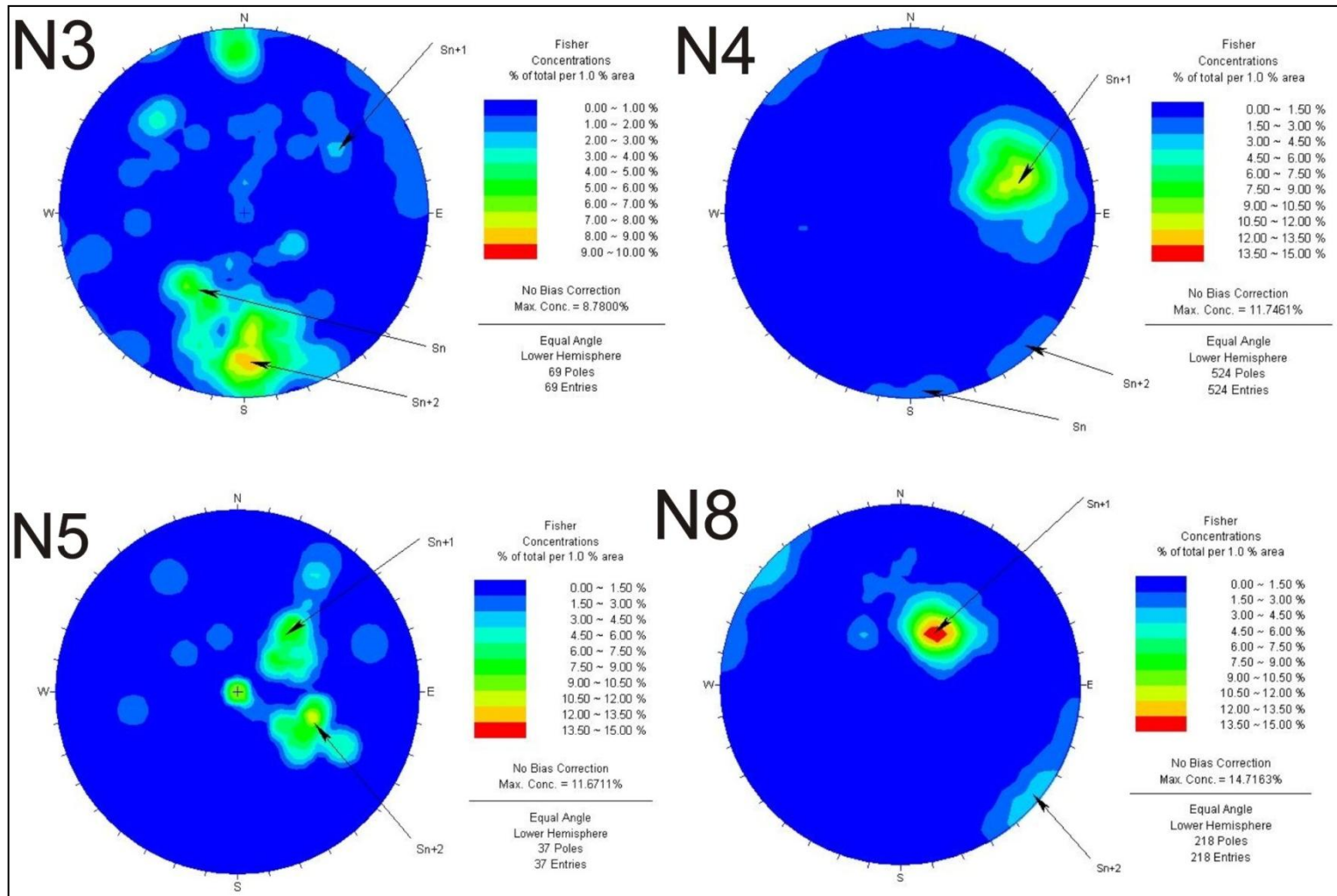


Fig. 21: Diagrams of frequency of spaced foliation and cleavages in N3, N4, N5 and N8 bodies obtained during field work to confirm the interpretations.

*Three-dimensional modeling obtained from the inversion of 3D-FTG airborne survey data and application of its geophysics in the resources estimate for near mine mineral exploration.*

Through three-dimensional modeling based on the inversion of 3D-FTG airborne survey data, according to the methodology suggested by Li and Oldenburg (1998) and Li (2001) we can estimate the mass of a given iron ore deposit. This practice has been adopted by Vale mining company in iron ore near mine projects, which provides fast and secure information for decision making.

In this study we compared the results of mass estimates for iron ore resources generated by inversion models, geological models and voxels model, and selected three areas in Serra Norte, N3, N6 and N8, since these areas have no mining activity, which allows comparisons between data obtained in different periods of time.

The usual method to obtain the estimated mass of the deposits is by building vertical geological sections supported by diamond drilling information and surface maps. Subsequently, a lateral extrusion of the polygons of these sections is done to produce a three-dimensional model, which in turn is discretized into blocks and sub-blocks.

The three-dimensional voxels model was generated with minimum curvature interpolation, producing voxels with 25m of side from the interpreted lithologic characterization data of intersections of diamond drilling, considering particle size and chemical results parameters.

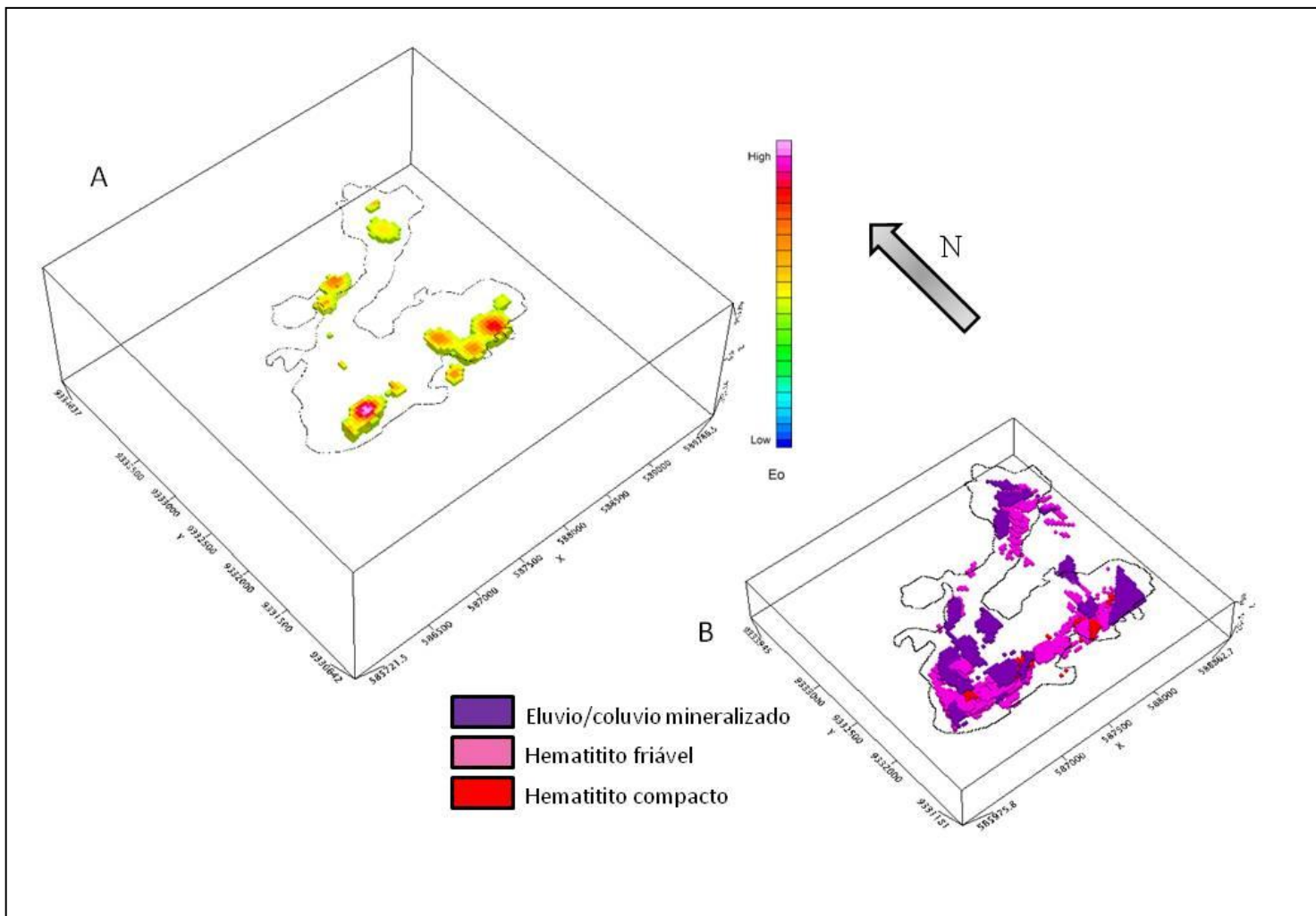
In Figure 6-23 we observe the N3 three-dimensional model, obtained from 3D-FTG data inversion, with the highest density contrast, that can be associated to iron ore mineralization. In this model we obtained a volume of 42.746.375 m<sup>3</sup>, which considered the average density of 3.12 ton/m<sup>3</sup> of friable hematitites, with a total mass of about 133Mt. In N6, considering the previous reasoning and as shown in Figure 6-24, the highest density contrasts total a volume of 12.718.750m<sup>3</sup>, which generates a mass of about 40Mt. For N8, Figure 6-25, the volume obtained was 50.625.000m<sup>3</sup>, producing a mass of nearly 157Mt.

In section view, the model of 3D-FTG data inversion shows good adhesion to boreholes and to the geological model, such as seen in Figure 6-26, Figure 6-27 and Figure 6-28, which show the intersection of the boreholes with the inversion model.

By comparing the mass values obtained from the inversion of 3D-FTG data with those obtained with geologic modeling and voxel modeling, we observed a average difference of 20% between these methodologies (Table 6-2). These slight differences are due to the correct adjustment of high values for these three areas for each model, a process done in a qualitative manner, but with sufficient criteria to establish premises to produce an inversion model and subsequent resource estimate. Generally, mass estimates are good, although they are completely obtained in an indirect form, being the inversion a powerful tool to make a preliminary evaluation of targets.

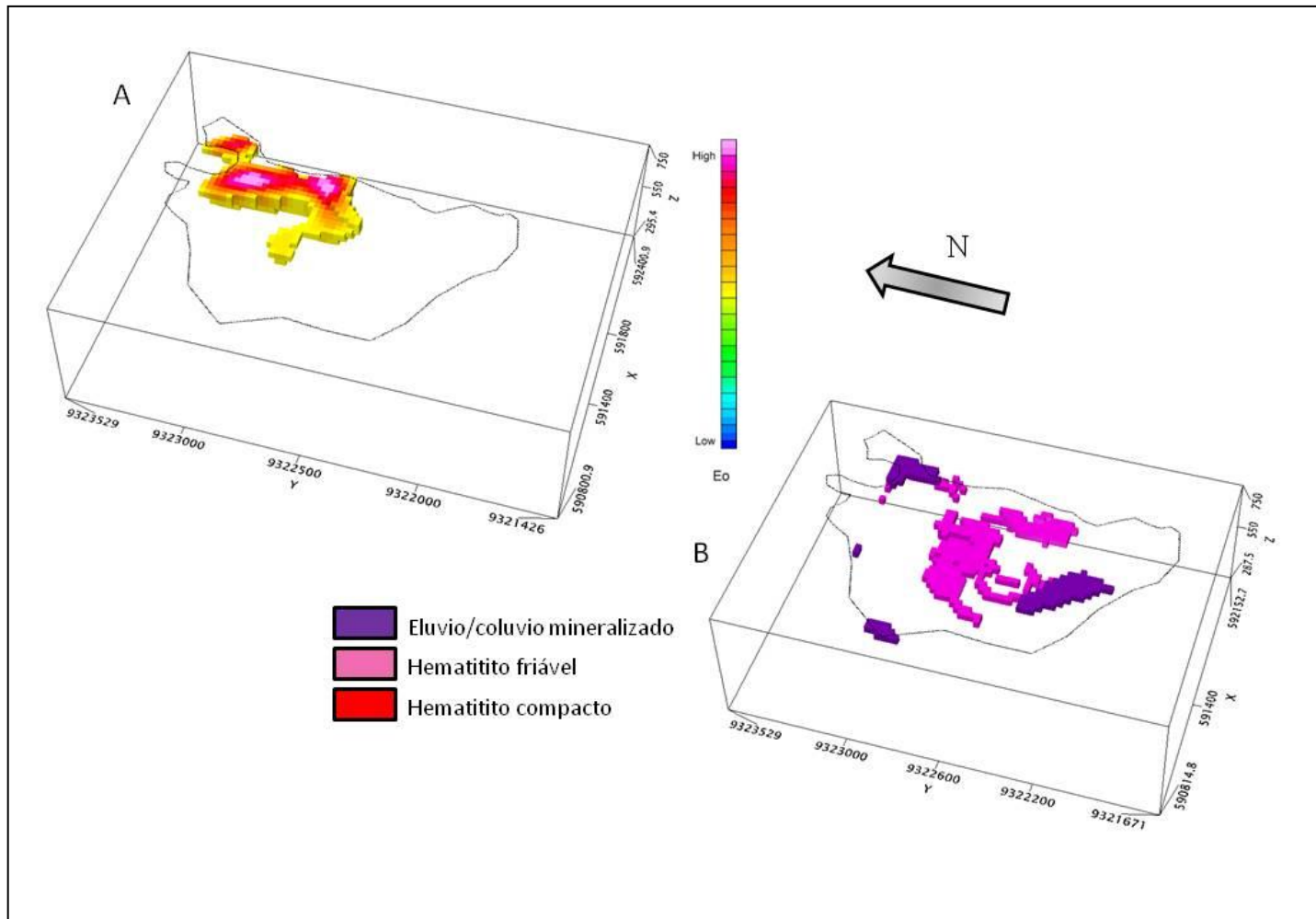
**Table 6-2:** Table comparing the methodologies for estimating potential resources.

Modeling methodology	Relation of resources masses			Average
	N3	N6	N8	
FTG Inversion/Geologic	0,74	0,71	0,89	0,78
Litho Voxels /Geologic	0,74	0,40	1,14	0,76
FTG Inversion /Litho Voxels	1,00	1,79	0,78	1,19

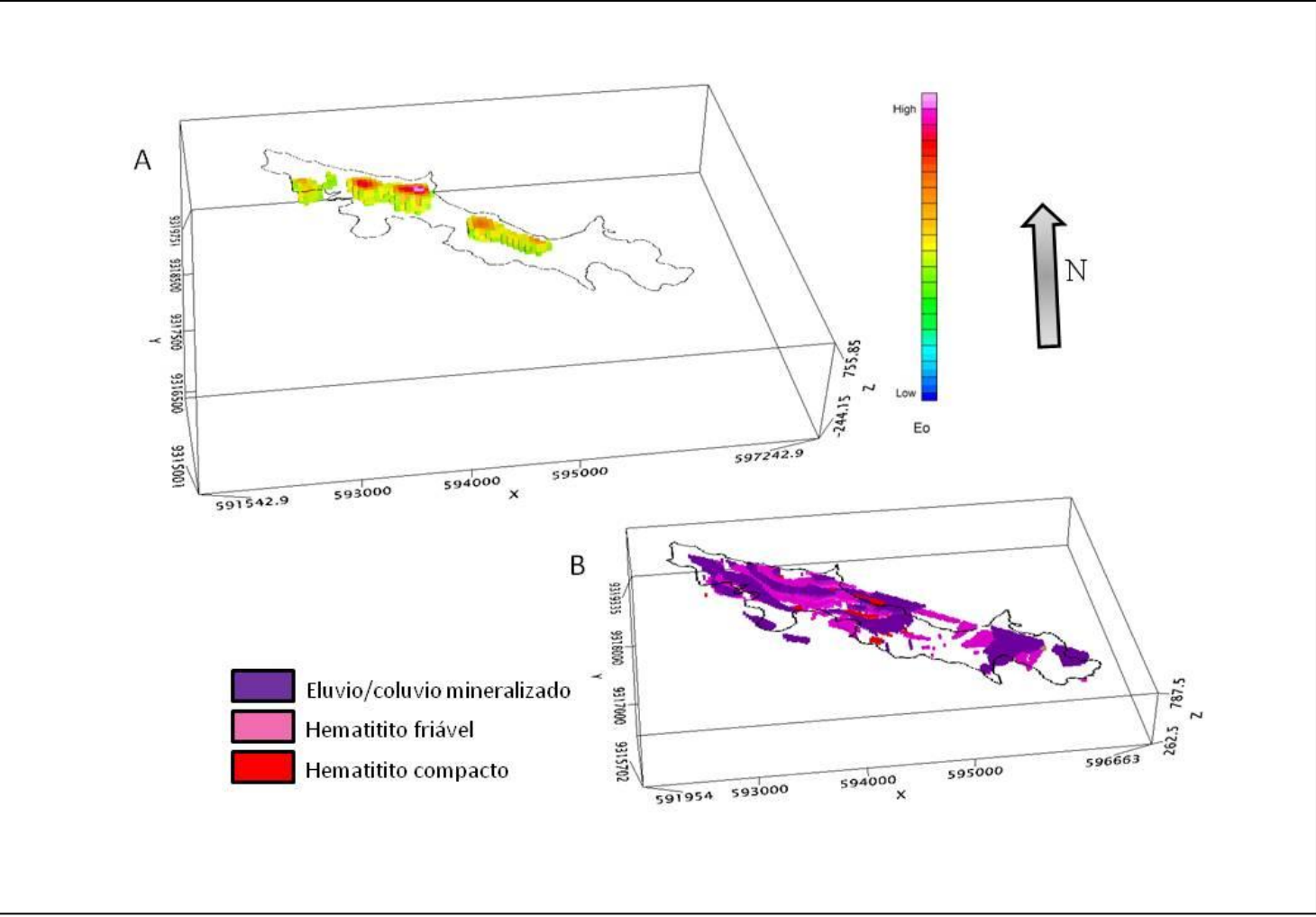


**Fig. 22:** Comparison between inversion and *Voxels* models in N3. A) Three-dimensional model of high gradient contrasts related to iron ore bodies; B) *Voxels* model on iron ore intersections.

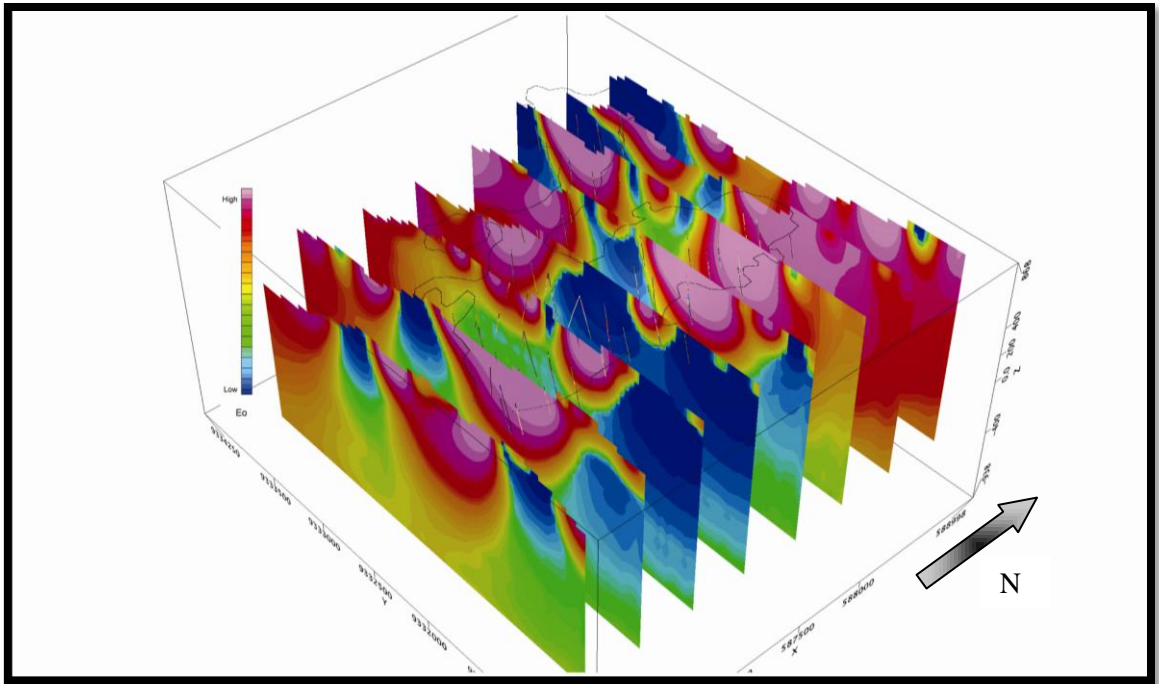




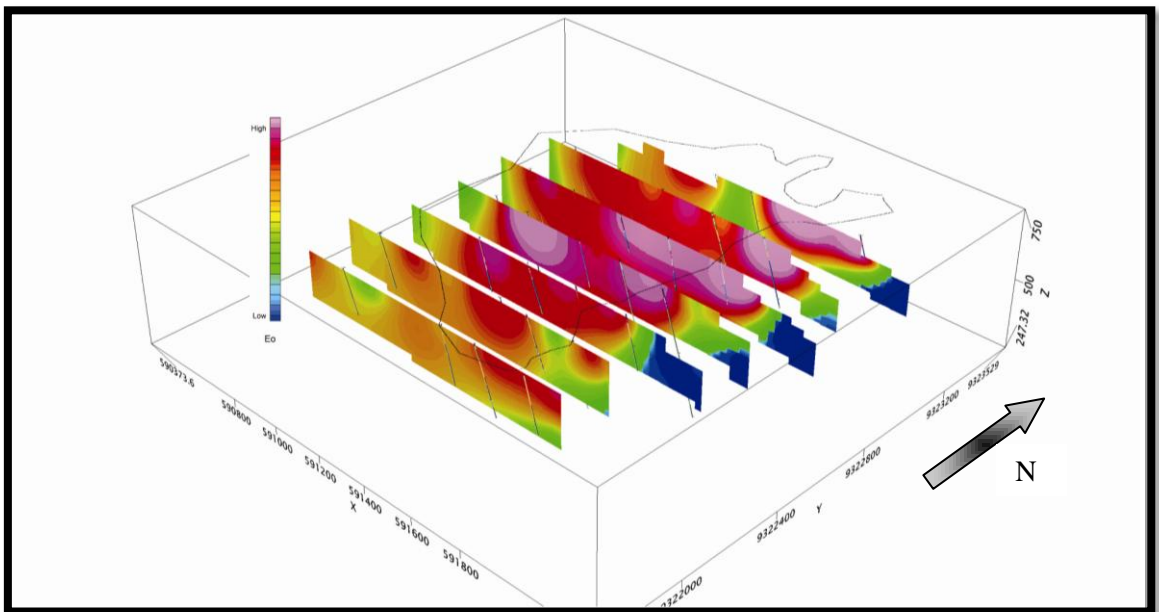
**Fig. 23:** Comparison between inversion and *Voxels* models in N6. A) Three-dimensional model of high gradient contrasts related to iron ore bodies; B) *Voxels* model on iron ore intersections.



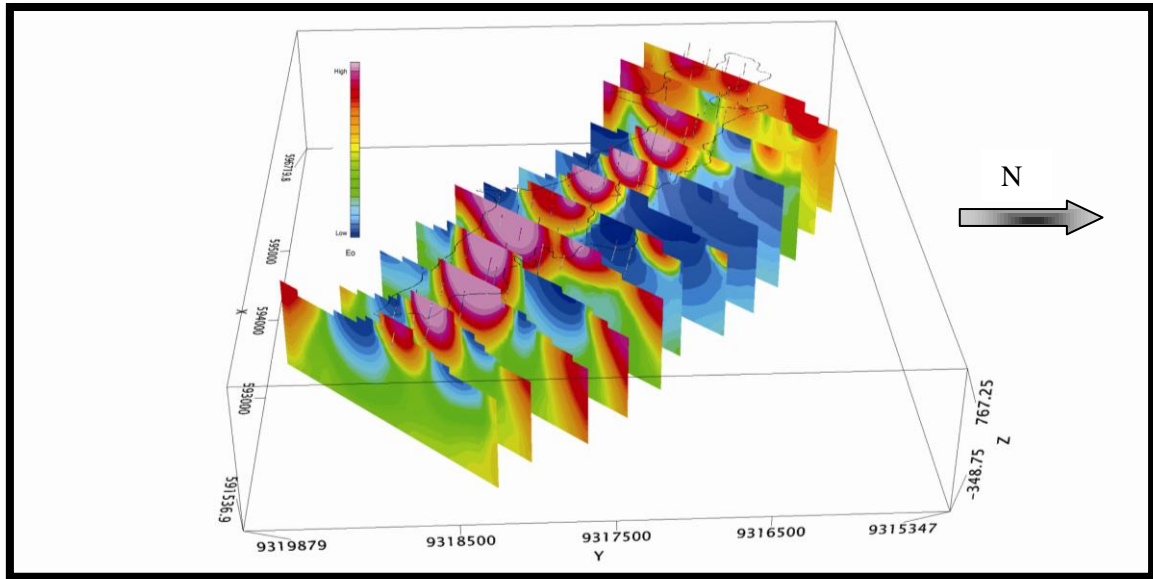
**Fig. 24:** Comparison between inversion and *Voxels* models in N8. A) Three-dimensional model of high gradient contrasts related to iron ore bodies; B) *Voxels* model on iron ore intersections.



**Fig. 25:** Cross sections of the three-dimensional model of 3D-FTG data inversion in N3, showing boreholes projection.



**Fig. 26:** Cross sections of the three-dimensional model of 3D-FTG data inversion in N6, showing boreholes projection.



**Fig. 27:** Cross sections of the three-dimensional model of 3D-FTG data inversion in N8, showing boreholes projection.

## Conclusions

Using processing and enhancement techniques applied on data from airborne magnetometric, gamma-ray spectrometric and gradiometric gravimetric surveys, common to both scholars and mineral sector, it was possible to define sufficient criteria for the preliminary assessment of iron ore deposits, as well as to establish surface and subsurface controls that allowed the delineation of a three dimensional envelope of the iron formation, its structural compartmentation and the estimated mass of iron ore resources. We emphasize that the estimates have an acceptable confidence level, considering they were obtained by indirect methods, despite the presence of vegetation or access to the site, which is common in the Amazon region.

As a frontier to be explored, we suggest the development and consolidation of methodologies for generating three-dimensional models based on the inversion of both magnetometric and gradiometric gravimetric data in an attempt to refine and differentiate iron ore and protore types. To assist in mapping regolith in a detailed scale, we suggest the acquisition of gamma-ray spectrometric data with 125m spacing as an alternative to orbital multispectral sensors.



By combining the tools discussed in this work and with the developments suggested, we believe we can provide support to decision making exploration work, for a better use of human and financial resources.

### Acknowledgements

We thank Vale SA for providing geological and geophysical data to make this research work; the colleagues from Vale and UnB for their contributions and discussions shared about Carajás iron ore and its host rocks; ICMBio and Carajás National Forest for allowing the development of works in this Sustainable Use Conservation Unit, thus giving us the opportunity to show that mining and nature conservation activities are compatible. Thanks to Professors Joel Buenaño Macambira (Ph.D.) and Welitom Rodrigues Borges (Ph.D.) for their contributions and suggestions. Professor Adalene Moreira Silva (Ph.D.) thanks CNPq for the search productivity scholarship - Process CNPQ 303275/2011-1.

### References

- Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N., Jorge João, X.S., Costa, J.B.S., 1988, A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás: Anais do Congresso Latinoamericano de Geologia, v. 1, p. 324-338.
- Araújo, O. J. B. & Maia, R. G. N., 1991, Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás, in: Subprojeto Recursos Minerais – Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. (Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM and Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM: Brasília, Brazil).
- Avelar, V. G., Lafon, J. M., Correia Jr, F. C., Macambira, M. J. B., 1999, O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás: Novos dados geocronológicos: Revista Brasileira de Geociências, v. 29(4), p. 453-460.
- Beisiegel, V.R., Bernardelli, A.L., Drummond, N.F., Ruff, A.W., Tremaine, J.W., 1973, Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 3, p. 215-242.
- Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H., 2003, Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM, Brasília, Brasil, p. 674.
- Blakely, R.J. & Simpson, R.W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: Geophysics, v. 51 (7), p. 1494-1498.
- Boyle, R. W., 1982, Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits: Developments in Economic Geology, v. 16, p. 71-78.

- Braga, M. A., 2009, Aplicação de Aerogravimetria Gravimétrica 3D-FTG na Prospecção de minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero (MG) e modelagem 2D e 3D para estimativa de massa do depósito de ferro de N1 em Carajás (PA); UFRJ, Tese de Doutorado, p. 271.
- Braga, M. A., Galbiatti, H., Carlos, D. U., Sousa, R. R., Almeida, T., 2009, Planejamento e controle de qualidade de dados de gradimetria gravimétrica 3D-FTG: Revista Brasileira de Geofísica, v.27(3), p. 447-457.
- Dalstra, H., Guedes, S., 2004, Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: A comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores: Economic Geology, v. 99, p. 1793-1800.
- Dardenne, M.A. & Schobbenhaus, C., 2001, Metalogênese do Brasil: Editora Universidade de Brasília, p. 392.
- DOCEGEO, 1988, Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás: Anais do congresso Brasileiro de Geologia, v. 35, p. 10-54.
- Efimov, A. V., 1978, Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym: Metody rudnoj geofiziki, Leningrado Naucnoproizvodstvennjoc objedinenie geofizica, p. 59-68.
- Figueiredo e Silva, R. C., 2004, Caracterização petrográfica e geoquímica de jaspilitos e minérios de ferro dos depósitos N1, N4W, N4E e N5E, Província Mineral Carajás, Pará: implicações para a mineralização de ferro: MSc dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geologia, Belo Horizonte, Brasil, p. 155.
- Flis, M., 2008, Advances in Geophysics Applied to the Search for Banded Iron Formation-Related, High-Grade Hematite Iron Ore, In: Banded Iron Formation-related high-grade iron ore: Reviews in Economic Geology, v. 15, p. 381-392.
- Galbiatti, H., Braga, M. A., Carlos, D. U., Sousa, R. R., 2011, Sistemas aerogravimétricos gradimétricos 3D-FTG e Falcon na exploração de minério de ferro: Revista Brasileira de Geofísica, v. 24 (4), p. 801-810.
- Gibbs A.K., Wirth K.R., Hirata W.K., Olszewski, W.S., 1986, Age and composition of the Grão Pará group volcanics, Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 16(2), p. 201-211.
- Gibbs, A.K. & Wirth K.R., 1990, Geologic setting of the Serra dos Carajás Iron Deposits, Brazil: Theophrastus Publications, p. 83-102.
- Hutchinson, M. F.; Stein, John A.; Stein, Janet L.; Xu, T., 2009, Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data, 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia
- Klein, C. & Ladeira, E. A., 2002, Petrology and geochemistry of the least-altered banded Iron-formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil: Economic Geology, v. 97, p. 643-651.
- Lengyel, Eric. "Voxel-Based Terrain for Real-Time Virtual Simulations", 2010, Doctor of Philosophy Thesis, University of California at Davis, p. 95.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998, 3-D inversion of gravity data: Geophysics, v. 63(1), p. 109-119.
- Li, Y., 2001, 3-D Inversion of gravity gradiometer data: Expanded Abstract, 71th Ann. Int. Mtg. Soc. Explor. Geophys., Tulsa.
- Lindenmayer, Z.G., Laux, J.H., Teixeira, J.B.G., 2001, Considerações sobre a origem das formações ferríferas da Formação Carajás, Serra dos Carajás: Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 21-28.

- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti, M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M., 2005a, A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província, in Marini, O. J., Queiroz, E. T., Ramos, B. W., Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia: DNPM/CTMineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Lobato, L. M., Figueiredo e Silva, R. C., Rosière, C. A., Zucchetti, M., Baars, F. J., Pimentel, M. M., Rios, F. J., Seoane, J. C. S., Monteiro, A. M., 2005b, Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará state, Brazil: Iron Ore 2005, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series v. 8 (2005), Australia, p. 99-110.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará: Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, p. 217.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., and Lindenmayer, D., 1991, UPb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil: Precambrian Research, v. 49, p. 329–354.
- Mataragio, J., Jorgensen, G., Carlos, D. U., Braga, M. A., 2011, State of the Art Techniques for Iron Oxide Exploration: 12<sup>o</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, v. 1.
- Meireles, E.M., Teixeira, J.T., Lourenço, R.S., Medeiros Filho, C.A., 1982, Geologia, estrutura e mineralização aurífera de Serra Pelada. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador, Anais, v. 3, p. 900-911.
- Meireles, E.M., Silva, A.R.B., 1988, Depósitos de ouro de Serra Pelada, Marabá, Pará. In: Schobbenhaus, C., Coelho, C.E.S. (coords.), Principais Depósitos Minerais do Brasil, DNPM, Brasília, v.III, p.547-557.
- Meirelles, M.R., 1986, Geoquímica e petrologia dos jaspilitos e rochas vulcânicas associadas, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás, Pará: Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 171 p.
- Monteiro, P. C., Rolando, A. P., Macambira, M. J. B., 2004, Proveniência de zircão de quartzitos da Formação Grotire e Grupo Rio Fresco, Serra do Inajá, Sul da Província Mineral de Carajás: Anais do 42<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geologia, 2004, Araxá.
- Murphy, C. A., 2004, The Air-FTG® airborne gravity gradiometer system. In R.J. Lane, editor, Airborne Gravity 2004 – Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop: Geoscience Australia Record v. 18 (2004), p. 7-14.
- Murphy, C. A., 2007, Interpreting FTG Gravity data using horizontal Tensor components: EGM 2007 International Workshop – Innovation in EM, Grav and Mag methods: new Perspective for Exploration.
- Nabighian, M.N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: Geophysics, v.37, p. 507-517.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations: Geophysics, v. 49, p. 780-786.
- Olszewski, W. J., Wirth, K. R., Gibbs, A. K., Gaudette, H. E. 1989. The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks. Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting: Precambrian Research, v. 42, p. 229-254.
- Pedersen, L. B. & Rasmussen T. M., 1990, The gradient tensor of potential field anomalies: some implications on data collection and data processing of maps: Geophysics, v. 55, p. 1558-1566.

- Pereira, R. M. P., 2009, Geologia da região sul da Serra Norte e características do minério de ferro do depósito N8, Província Mineral de Carajás: Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 131.
- Phillips, J. D., 2000, Locating magnetic contacts: A comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. In: 70th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, p. 402-405.
- Pidgeon, R., Macambira, M. J. B., Lafon, J. M., 2000, Th-U-Pb isotopic systems and internal structures from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite: *Chemical Geology*, v. 166, p.159-171.
- Pimentel, M.M., Machado, N., 1994, Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará: SBG, Congresso Brasileiro Geologia 38, Camburiú, Anais, v. 2, p. 390-391.
- Pinheiro, R.V.,L., and Holdsworth, 1997, The structure of the Carajás ironstone deposit and associated rocks: Relationship to archean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 10, p. 305–321.
- Prichystal, A., Gnojek, I., 1985, A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia): *Geoexploration*, v. 23, p. 491-502.
- Resende N.P., e Barbosa A.L.M., 1972, Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. AMZA, Relatório Final de Pesquisa, v. 1, texto, 248 p, v. 2, mapas e seções geológicas, p. 119.
- Rio Doce Geologia e Mineração, 1984, In: Meireles, E. M., Hirata, W. K., Amaral, A. F., Medeiros Filho, C. A., Gato, W. C., 1984, Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral de Carajás, Estado do Pará: Anais do 33º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 5, p. 2164-2174.
- Rodrigues E., Lafon J.M., Scheller T., 1992, Geocronologia Pb-Pb da Província mineral de Carajás: primeiros resultados: Congresso de Geologia, São Paulo, Boletim de Resumos expandidos, v. 37, p.183-184.
- Roest, W. R., Verhoef, V., Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, v. 57, p. 116–125.
- Rosière, C.A., Seoane, J.C.S., Baars, F.J., Lobato, L.M., 2004, Estruturação da província de Carajás e sua influência na mineralização de ferro, PA: ADIMB, Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto, CD-ROM.
- Rosière, C. A., Baars, F. J., Seoane, J. C. S., Lobato, L. M., da Silva, L. L., de Souza, S. R. C., Mendes, G. E., 2005, Structure and iron mineralisation of the Carajás Province, in: *Proceedings Iron Ore 2005*, p. 143-150 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Silva, G.G., Lima, M.J.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G., 1974, Levantamentos de recursos naturais, geologia, folhas SB 22 Araguaia e parte SC 22 Tocantins: Projeto RADAM BRASIL. Rio de Janeiro, p. 143.
- Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., Scheller, T., 1996, Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaúnas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas: SBG, V Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, p. 380–382.
- Souza, Z.S., Potrel, A., Lafon, J.M., Althoff, F.J., Pimentel, M.M., Dall’Agnol, R., Oliveira, C.G., 2001, Nd, Pb, and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, v. 109, p. 293-315.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 1999, Geochronological Provinces of the Amazonian Craton: Episodes, v. 22(3), p. 174-182.



- Tassinari, C.C.G., 1996, O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, p. 139.
- Teixeira, J.B.G., 1994, Geochemistry, Petrology, and Tectonic Setting of Archean Basaltic and Dioritic Rocks from the N4 Iron Deposit, Serra dos Carajás, Pará, Brazil: Doctor of Philosophy Thesis, Department of Geosciences, Penn State University, p. 161
- Teixeira, J.B.G., Ohmoto, H., Eggler, D.H., 1997, Elemental and oxygen isotope variations in Archean mafic rocks associated with the banded iron-formation at the N4 iron deposit, Carajás, Brazil, in, Costa, M.L., Angélica, R.S., Contribuições a Geologia da Amazônia, FINEP/SBG, p. 161-203.
- Tolbert G.E., Tremaine J.W., Melcher G.C., Gomes C.B., 1971, The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, Northern Brazil: Economic Geology, v. 7, p. 985-994.
- Trendall, A.F., Basei, M.A.S., de Laeter, J.R., and Nelson, D.R., 1998, Ion microprobe zircon, U-Pb results from the Carajás area of the Amazon Craton: Journal of South American Earth Sciences, v. 11, p. 265–276.
- Valadão, C., Chausson, D.S., Moura, L.G.B., Mastrela, R., 2012, Resource and Reserve Statement, Vale - Iron Ore, Annual Report, p. 13.
- Wilford, J. R., Bierwirth, P. N., Craig, M. A., 1997, Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology: AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17(2), p. 201–216.
- Wirth, K.R., Gibbs, A.K., and Olzewski, Jr., W.J., 1986, U-Pb zircon ages of the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite: Revista Brasileira de Geociências, v. 16, p. 195–200.
- Zucchetti, M., 2007, Rochas máficas do Supergrupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA: Tese de Doutorado, UFMG, Minas Gerais, Brasil, p. 166.
- Zacchi, E. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K., 2010, Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG: Revista Brasileira de Geofísica, v. 28, p. 643-656.