

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA- UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS- IG**

**APLICAÇÃO DE DADOS MAGNÉTICOS GRADIOMÉTRICOS E
GAMAESPECTROMÉTRICOS NO TERRENO GRANITO-
GREENSTONE BELT TRÊS PALMEIRAS, VOLTA GRANDE
DO XINGU, PARÁ: IMPLICAÇÕES NA CARACTERIZAÇÃO
GEOLÓGICO-GEOFÍSICA E NA SELEÇÃO DE ALVOS PARA
EXPLORAÇÃO MINERAL.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Andréia Cristina Ruy

Brasília, DF, 2009



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA- UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS- IG

**Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e
gamaespectrométricos no Terreno Granito-Greenstone Belt Três
Palmeiras, Volta Grande do Xingu, Pará: Implicações na
caracterização geológico-geofísica e na seleção de alvos para
exploração mineral.**

ANDRÉIA CRISTINA RUY

Mestrado No. 259

Orientador:

Prof. Dra. Adalene Moreira Silva

Co-orientador:

Msc. Walid El Koury Daoud

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta

Prof. Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira

BRASÍLIA, DF
2009

*A meus pais,
por acreditarem no inalcançável,
o meu eterno agradecimento.*

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer a Prof. Dr. Adalene Moreira Silva, pelo apoio e incentivo nessa jornada, momentos de discussão, de conversa e de amizade. A banca examinadora, composta pelos professores Dr. Álvaro Penteado Crósta e Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira pela gentileza de participarem da minha formação acadêmica.

Aos mestres da UnB que tive o privilégio de conviver durante esta dissertação de mestrado. Em especial ao Prof. Augusto Cesar Pires pelo apoio no meu mestrado. Agradeço também o suporte técnico do LGA e as secretárias da pós-graduação Francisca e Stela pelo suporte acadêmico.

A empresa Verena Mineração *Ltda*, nas pessoas de Walid El Koury Daoud, Elmer Salomão Prata e Jad Salomão Neto, pela concessão dos dados e sugestões no trabalho, assim como o auxílio na execução das etapas de minha dissertação. Agradeço também a toda a equipe de escritório e de campo.

Pela companhia de colegas pós-graduandos em especial aos meus amigos Erico, Cimara e Cristina pelos horários de break e de muita geologia. A Juliane e Cassiane pelos momentos lúdicos da minha passagem por Brasília. Vocês fizeram eu me sentir em casa inúmeras vezes. Aos amigos Marcus, Eliezer e Laura pelas muitas risadas juntos.

A Sandrine por ter me acompanhado em Brasília e me suportado em BH também. Essa parceria ainda vai longe.

Ao André pela acolhida nos meus momentos mais diversos.

Aos amigos da Vale que me ajudaram na adaptação a nova vida, em especial a Ana Gonçalves, Aninha, Ju Uchoa, Tatá, Tapia e Jairo.

Aos meus pais e avô, Margarida, Luiz e Ângelo, exemplo de vida para mim, e as minhas irmãs Drika e a Lê, figuras constantes de meus pensamentos. Meu amor por vocês vai além da distância que nos separa. Não menos importante, ao Guilherme, por ser essa pessoa tão presente.

A todas as pessoas que passaram pela minha vida e deixaram sua contribuição.

A Deus por iluminar meus passos, sempre!

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1- INTRODUÇÃO	1
2- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	6
3- SINTESE DOS RESULTADOS.....	7
4- CONCLUSÕES.....	10
5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
ANEXO 1- Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos na caracterização geológico-geofísica do terreno granito-greenstone belt Três Palmeiras, Pará.....	19
ANEXO 2 - Modelagem espacial de dados geofísicos e sua integração com dados geológicos para prospecção aurífera na região do Greenstone Belt Três Palmeiras, Pará.....	56

LISTA DE FIGURAS

CORPO DA DISSERTAÇÃO

Figura 1- O polígono irregular indica a localização da área estudo desta dissertação de mestrado na região de Volta Grande do Xingu estado do Pará.....	3
Figura 2 - Mapa de linhas de vôo da área que recobre o estudo	5

ANEXO 1

Figura 1 – Localização da área em estudo, delimitada pelo polígono branco.	23
Figura 2 – Mapa geológico da porção leste do Domínio Bacajá (Vasquez et al. 2008a). O polígono amarelo representa a área de estudo.....	26
Figura 3 – Bloco diagrama dos corpos mineralizados da área representando os blocos tabulares seguindo o trend regional.	28
Figura 4 – Seção transversal exemplificando o modelo para a mineralização na área do projeto Volta Grande.	28
Figura 5 – Perfil de alteração em saprólito, destacando intenso cisalhamento em rocha metavulcânica da Sequência Três Palmeiras.	29
Figura 6 – Veio de quartzo em diorito.	29
Figura 9 – Milonito cortado por vênulas discordantes, associado a ouro invisível	30

Figura 10 – Localização dos blocos mineralizados estudados pela empresa Verena ..	31
Figura 11 – Gradiente Horizontal Lateral (GRX) em escala de cinza para a área em estudo.	34
Figura 12 – Gradiente Horizontal Longitudinal (GRY) em escala de cinza	35
Figura 13 – Amplitude do sinal análico do campo magnético anômalo.....	36
Figura 14 – Fluxograma ilustrando as principais etapas de realce e processamento dos dados magnéticos, bem como a extração dos domínios e estruturas magnéticas.	37
Figura 15 – Fluxograma exibindo as etapas de realce e interpretação dos domínios aerogamaespectrométricos.....	38
Figura 16 – Composição ternária RGB para os canais gamaespectrométricos. (Red = Potássio, Green = Tório e Blue = Urânio).	39
Figura 17 – Mapa integrado dos domínios e lineamentos magnéticos.	41
Figura 18 – Mapa litogeofísico para a região do Volta Grande, em escala 1:100000... ..	42
Figura 19 – Arquitetura da rede neural artificial do sistema Probabilistic Neural Networks	43
Figura 20 – Petromapa em escala 1:100000, delimitando 8 domínios.....	45
Figura 21 – Mapa de assinaturas associadas a rochas do Greenstone Belt Três Palmeiras.	46
Figura 22 – A - Mapa geológico proposto por Vasquez (2008) e B - Mapa geofísico-geológico interpretação neste trabalho.	47
Figura 23 – Região mineralizada representada sobre a imagem da Primeira Derivada Vertical (23 A) e o Gradiente Horizontal Longitudinal (23 B).....	50

ANEXO 2

Figura 1 – Mapa geológico da porção leste do Domínio Bacajá (Vasquez <i>et al.</i> 2008a). O polígono amarelo representa a área de estudo.....	61
Figura 2 – Bloco diagrama dos corpos mineralizados da área representando os blocos tabulares seguindo o trend regional (Fonte: Verena Mineração <i>Ltda.</i>).	62
Figura 3 – Seção transversal exemplificando o modelo para a mineralização na área do projeto Volta Grande.	63
Figura 4 – Veio de quartzo em diorito	64
Figura 5 – Milonito cortado por vênulas discordantes, associado a ouro invisível.	64
Figura 6 – Localização dos granitóides hospedeiros da mineralização.....	65
Figura 7 – Fluxo de dados para confecção de mapa de favorabilidade	67

Figura 8 – Ângulo espectral entre material A e B em dois canais (Kruse <i>et al.</i> 1993)...	68
Figura 9 – Resposta da classificação SAM baseado no assinatura de referência localizado no corpo Ouro Verde.....	69
Figura 10 – Resposta da classificação SAM para o corpo Pequi.....	70
Figura 11 – Arquitetura da rede neural artificial do sistema <i>Probabilistic Neural Networks</i>	71
Figura 12 – Assinatura do Bloco Norte, identificando como características três assinaturas para a minealização, distintas entre o corpo Grota Seca e Ouro Verde. ...	72
Figura 13 – Mapas binário da amplitude do sinal analítico (a), potássio (b), tório, Th (c), urânio, U (d). Área em roxo, <i>inside</i> e área em branco, <i>outside</i>	75
Figura 14 – Modelo WofE para o bloco norte.....	76
Figura 15 – Função aplicada pelo método Fuzzy.....	77
Figura 16 – Potássio Anômalo aplicado para a área.....	78
Figura 18 – Mapa prospectivo para ouro utilizando lógica fuzzy.....	80

LISTA DE TABELAS

ANEXO 2

Tabela 1 – Pontos de treinamento para o Bloco Norte.....	74
Tabela 2 – Teste de condição de independência para o modelo gerado. Dados nos métodos Conditional Independence Ratio (CIR) e Agterberg & Cheng Conditional Independence Test (A&C CIT).	75
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para a fuzificação.	79

RESUMO

Os depósitos e ocorrências de ouro orogênico hospedados no Greenstone Três Palmeiras no Domínio Bacajá, Cráton Amazônico apresentam elementos chave para atestar o valor da continuidade na exploração regional e a importância no uso de dados aerogeofísicos em regiões amazônicas. O objetivo deste trabalho é utilizar dados aerogeofísicos de alta resolução em terrenos intemperizados, auxiliando no mapeamento geológico e na aplicação de análise espacial para seleção de alvos para mineralização aurífera, como um guia de decisões na exploração.

Na região afloram diversos granitóides e rochas da sequência *greenstone belt* Três Palmeiras, compreendendo corpos alongados na direção WNW-ESSE. Os dados aerogeofísicos de alta resolução (magnetometria gradiométrica e gamaespectrometria) foram processados e integrados fornecendo produtos para a interpretação estrutural e geológica, resultando no refinamento do mapa geológico divulgado por Vasquez (2008). Neste contexto destaca-se a magnetometria gradiométrica, pelo realce do sinal de pequenos corpos. A integração dos dados geológicos e geofísicos foi efetiva na caracterização e delimitação de contatos de corpos granitóides e dos litotipos do *greenstone belt*, que hospedam as mineralizações auríferas.

O mapeamento da favorabilidade mineral resultou da aplicação de técnicas de análise espacial em ambiente SIG no terreno granito *greenstone* Três Palmeiras onde o desempenho de modelos prospectivo pode ser utilizada para seleção mais eficiente de alvos. O tipo de depósito da área é do tipo ouro orogênico e os principais dados evidenciais usados derivaram de aerolevante aerogeofísico de alta resolução. Os parâmetros chave usados para o mapeamento da mineralização aurífera foram: i) baixo gradiente magnético, ii) proximidade do contato granitóides- *greenstone belt* iii) anomalia potássica. O modelo de rede neural artificial (RNA) é conhecido como uma ferramenta capaz de adicionar boas características que proveram novas possibilidades de exploração no dado. A função de base radial (RBFLN), uma função de RNA, foi eficiente na geração de um mapa prospectivo com background geológico. O resultado foi denominado petromapa e proveu o melhor resultado para a área total que as técnicas peso de evidência e lógica fuzzy. O modelo executado com peso de evidência produziu um bom resultado para o bloco norte, mostrando capacidade predictiva de incorporação e integração dos dados melhorando a seleção dos alvos. Um modelo conceitual da lógica fuzzy foi aplicado no bloco sul devido a um número pequeno de ocorrências conhecidas. O resultado deste modelo foi validado em campo e indicou boa compatibilidade com o modelo. A técnica SAM apresentou bons resultados para a área nos dois blocos, ressaltando áreas com respostas semelhantes ao assinatura de referência mineralizado. As técnicas de modelagem espacial foram capazes de incorporar e integrar dados aerogeofísicos e interpretações geológicas ampliando a capacidade dos mapas prospectivos e ampliando o número de alvos.

Palavras chave: Aerogeofísica, cartografia geológica, modelagem espacial, Greenstone Belt Três Palmeiras, mineralização aurífera.

ABSTRACT

The Três Palmeiras Greenstone-hosted orogenic deposit and other occurrences in Bacajá Domain, Amazonian craton, revealed as key elements to attest the continued value of regional exploration and the importance to use airborne geophysics in the Amazonian region. The aim is use high-density airborne geophysical data in highly weathered terrains, supporting the geological mapping and the application of spatial analysis to select targets for gold mineralization, as a guide in exploration decisions.

The main results of this thesis show significant advances have been made on proven high resolution airborne geophysical methods to interpret and to visualize geophysical data. Such advances reach their impact by appropriate consideration of the adequate geophysical products in low magnetic latitudes. The high-density airborne geophysical data (magnetic gradiometry and gamma spectrometry) were processed and integrated, resulting in products that show high potential to obtain better definition in geological contacts and tectonic structures, resulting in a refinement for Vasquez geological map. In this context, stands the gradiometric magnetometry for the improvement in anomalies over small magnetic sources. The geophysical and geological integration shows high potential to better define geological contacts for granitoids and greenstone belt rocks, which hosts the gold mineralization.

The mineral favorability mapping results using spatial analysis in GIS within the Três Palmeiras granite-greenstone terrane shows that the performance of prospectivity mapping models can use for a more efficiently target selection. The deposit type and occurrences concerned are orogenic gold deposits and the main evidence data used for modeling were derived from high resolution airborne geophysics. The key parameters used to describe the orogenic gold mineralization were: i) low magnetic gradients, ii) proximity to granitoids-greenstone belt contacts and iii) anomalous potassium. The artificial neural networks (ANN) model is known as tool that can deal with uncertainty, a great characteristic that provides new possibilities for data exploration. The radial basis functional link nets (RBFLN), a form of ANN, was efficient to generate a prospectivity map with geological background. The result was named Petromap and performed a better result for the total modeled area than fuzzy logic and weights of evidence methods. The weights of evidence predictive model worked well to the North Block, showing the predictive capacity of incorporating and integrating the datasets in order to improve the targeting selection. A conceptual fuzzy logic model was applied to the South Block due the small number of known occurrences. The results of this model were validated with field results and indicated good reliability of the models. However, some areas need field tests. The SAM presented satisfactory results for both blocks, highlighting areas with the same response as the mineralized endemember. This spatial modeling techniques were capable of incorporating and integration geophysical data and geological interpretation in order to improve the capacity of prospective maps and new targets.

Key words: Airborne geophysics, geological cartography, spatial modeling, Greenstone Belt Três Palmeiras, gold mineralization.

1– INTRODUÇÃO

1. 1 - Apresentação

A região amazônica apresenta algumas limitações naturais que dificultam a aquisição de informações geológicas de campo, as quais incluem um espesso e contínuo perfil de solos desenvolvido sobre o substrato rochoso, provocando uma escassez de afloramentos naturais. Em áreas de floresta amazônica, dados de sensoriamento remoto orbital e de geofísica aeroportada são, em geral, a melhor alternativa para substanciar e expandir espacialmente as informações geológicas obtidas no campo (Paradella *et al.* 1999, Cunha *et al.* 2006, Carneiro *et al.* 2006). Neste contexto, destaca-se a aerogeofísica por contribuir efetivamente na visualização da distribuição e configuração espacial das unidades litológicas e estruturas tectônicas, solidificando-se como uma importante ferramenta de apoio à exploração mineral (Silva 2003, Rosa-Costa *et al.* 2003, Silva *et al.* 2007, Carneiro *et al.* 2007).

A área de estudo, o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, pertence ao Domínio Bacajá e localiza-se no sudeste do Cráton Amazônico. Este domínio representa a parte sul da Província Maroni-Itacaiunas (Cordani *et al.* 1979, Tassinari & Macambira 1999, 2004) ou Província Transamazonas (Santos 2003, Vasquez & Rosa-Costa 2008). A área apresenta várias ocorrências de ouro mapeadas, onde empresas de exploração mineral têm bloqueado reservas importantes (Jorge João *et al.* 1987).

O emprego de métodos indiretos e sua posterior modelagem visam, portanto a descoberta de áreas potenciais para exploração. Vários estudos de caso vem sendo desenvolvidos com intuito de selecionar regiões potenciais em áreas de *greenfield* na Amazonia Brasileira. Esta dissertação mestrado tem como meta contribuir com um novo estudo de caso através do processamento e da análise integrada de dados aerogeofísicos aliados aos dados de campo (mapas geológicos, geoquímica de solo e furos de sondagem) na região de Volta Grande do Xingu.

1. 2 Objetivos

Este trabalho de pesquisa objetiva a caracterização das assinaturas geológico-geofísicas na região de Volta Grande do Xingu, estado do Pará, com o intuito de refinar

a cartografia geológica a partir de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos de alta resolução integrados com dados de sensores remotos e geológicos. Ao final, pretende-se, através de análises espaciais, apontar novas potenciais na região em apreço. Para tanto, traçou-se os seguintes objetivos específicos:

- (i) mapear estruturas regionais e locais, utilizando dados aerogeofísicos de alta resolução, de sensores remotos, e informações de campo, com o intuito de definir zonas de influência metalogenética;
- (ii) Refinar os dados geológicos regionais na área de interesse através da interpolação dos dados aerogeofísicos e geológicos pré-existent;
- (iii) Geração de modelos de previsão para ouro através de técnicas de análise espacial, em ambiente de informações geográficas, com intuito de produzir mapas prospectivos convenientes para a interpretação geológica e exploração mineral na área de estudo.

1.3 - Localização e acesso a área

A área de estudo se localiza na porção central do estado do Pará, a sudeste de Altamira e próxima ao Rio Xingu, perfazendo aproximadamente 555 Km² (Figura 1). O acesso a área se dá pela Rodovia Transamazônica até o município de Altamira, onde a continuação do percurso é feita por via fluvial.

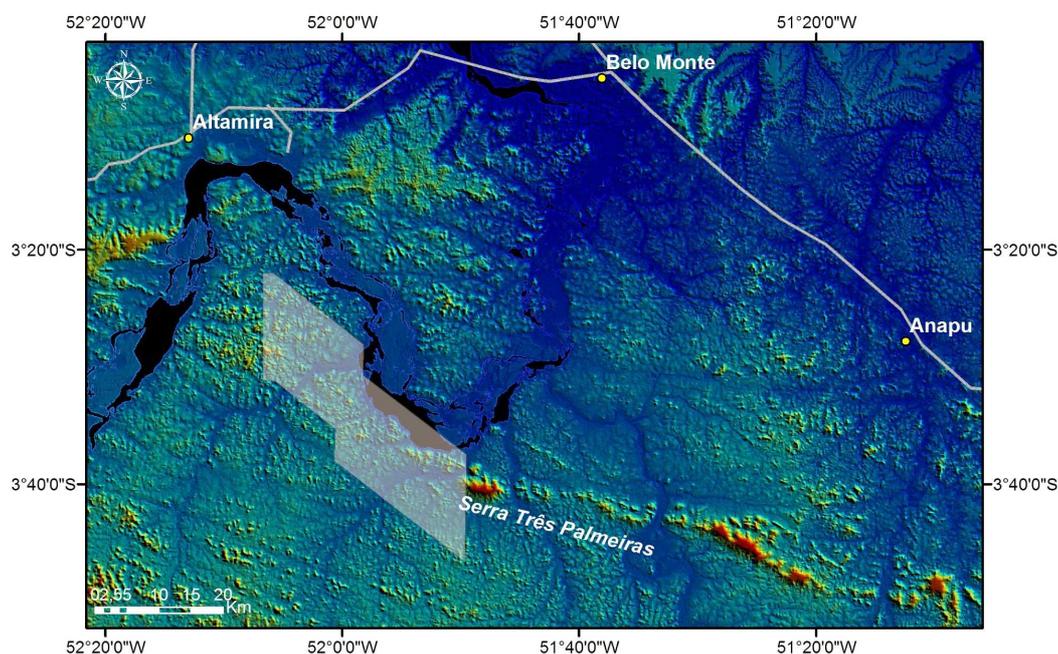


Figura 1- O polígono irregular indica a localização da área estudo desta dissertação de mestrado na região de Volta Grande do Xingu estado do Pará. Este polígono marca a área recoberta por dados aerogeofísicos de alta resolução e foi plotado sobre a composição em falsa cor gerada a partir de dados do sensor SRTM, com sombreamento NE. Na Figura também está indicada a principal via de acesso, cidades principais e a expressão da Serra Três Palmeiras.

1.4 – Contexto geológico-regional e a mineralização aurífera

A área insere-se na porção oeste do Domínio Bacajá, inserido na Província Transamazonas de Santos (2003) ou Província Maroni-Itacaiúnas (Tassinari & Macambira 1999) do Cráton Amazônico.

Síntese do modelo evolutivo da Província Maroni-Itacaiúnas

Segundo Tassinari & Macambira (1999), sua evolução está relacionada às orogêneses do Ciclo Transamazônico (2,2 – 1,95 Ga), consistindo de domínios de crosta juvenil paleoproterozóica e de blocos arqueanos retrabalhados no Paleoproterozóico (Teixeira *et al.* 1989, Tassinari 1996, Tassinari & Macambira 1999, 2004, Tassinari *et al.* 2000).

O modelo geodinâmico proposto para esse domínio inicia com abertura oceânica e formação de crosta juvenil entre 2,26 e 2,0 Ga, seguidas de convergência marcada por subducção e formação de arcos de ilha de 2,18 a 2,13 Ga, transcorrência, retrabalhamento crustal e sedimentação de bacias *pull-apart* entre 2,11 e 2,08 Ga. Ele

finaliza com adelgaçamento crustal e exumação de crosta inferior entre 2,07 e 2,05 Ga, marcados pela colocação de granitos pós-transcorrentes e charnoquitos, metamorfismo granulítico, localmente de UHT (*ultrahigh-temperature*), e metamorfismo de soterramento das bacias *pull-apart*, seguidos de resfriamento isobárico (Vanderhaeghe *et al.* 1998, Delor *et al.* 2003, Vasquez *et al.* 2008).

Caracterização geológica do Domínio Bacajá

O Domínio Bacajá é composto pelo magmatismo transamazônico com fontes juvenis e de contribuição crustal arqueana (Macambira *et al.* 2004, Vasquez *et al.* 2008). Seu embasamento é composto por ortognaisses, paragnaisse, ortogranulito e migmatito, cujas rochas ocorrem maciças e com enclave em granitóides (Macambira *et al.* 2005). Vasquez *et al.* (2008) agrupa a geologia do domínio em associações litológicas e estabelece seis associações distintas: ortognaisses, rochas metassedimentares, ortogranulitos, sequências metavulcano-sedimentares, granitóides e rochas charnoquíticas (Figura 02). As unidades estruturam-se segundo NW-SE e WNW-ESSE, caracterizando uma tectônica transcorrente, marcada por extensas zonas de cisalhamento paralelas e contínuas, que imprimem uma deformação dúctil (Faraco 2005).

Mineralização Aurífera

Os depósitos auríferos estão associados à zonas de cisalhamento NW-SE e WNW-ESSE, sendo caracterizados por vênulas de quartzo, desenvolvidas na zona de contato de intrusões graníticas e rochas meta-vulcano sedimentares do Greenstone Belt Três Palmeiras.

1.5 - Natureza dos dados estudados

O projeto é apoiado pela parceria entre a UnB e a empresa Verena Mineração Ltda, detentora dos direitos minerais na área. Para os estudos foram cedidos os dados do levantamento aerogeofísico, furos de sondagens e dados geoquímicos realizados em solo.

1.5a - Dados Aerogeofísicos

Os dados geofísicos são oriundos de um aerolevanteamento realizado pela empresa LASA em junho de 2007 para a empresa Verena Mineração Ltda. O

levantamento aerogamaespectrométrico e aeromagnético recobriu a área do projeto Volta Grande do Xingu e entorno, totalizando aproximadamente 555 Km² e 3.087,00 km de perfis de alta resolução (Figura 04). As linhas de vôo possuem direção N-S, com linhas de controle são perpendiculares, espaçadas de 200m e 2000m respectivamente. O sobrevôo foi realizado a 100 m de altitude Ao longo dos perfis foram realizadas dez leituras de dados com magnetômetro e uma medida do gamaespectrômetro a cada segundo, posicionadas através de sistema de observação de satélite GPS, com precisão melhor do que 5 m. Os dados de DGPS foram registrados a bordo da aeronave, pelo sistema FASDAS. Para monitoração da variação diurna do campo magnético terrestre foi utilizada uma estação base de utilizando um magnetômetro, instalada no aeroporto de Altamira (PA) Lasa (2007).

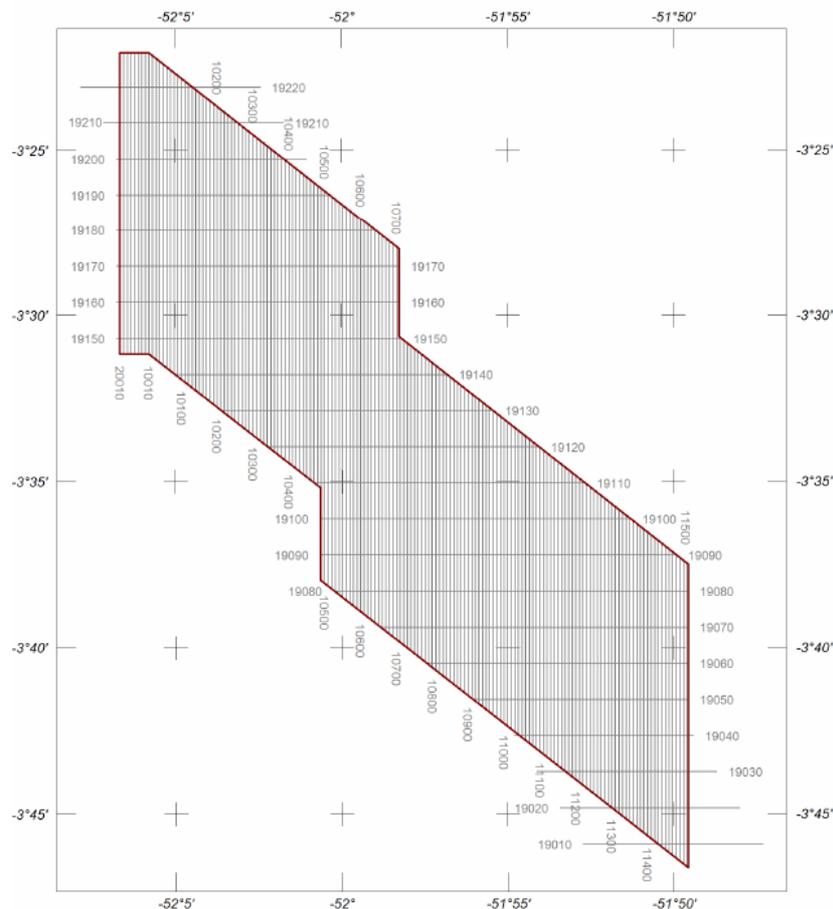


Figura 2 - Mapa de linhas de vôo da área que recobre o estudo. As linhas de vôo apresentam espaçamento de 200m e direção N-S e são cortadas perpendicularmente por linhas de controle com espaçamento 2.000m.

1.5b - Dados Cartográficos e de ocorrências minerais

Os dados utilizados nesta pesquisa possuem diferentes resoluções. Dados regionais foram compilados a partir dos mapas geológicos e metalogenético, da Folha Altamira (SA. 22-Y-D), em escala 1:250.000 e mapa geológico do estado do Pará, 1:1000000, ambos executados pelo CPRM. Dados geológicos em escala de detalhe (1:25.000 e 1:5.000) foram cedidos pela Verena Mineração.

Dados recém atualizados com as ocorrências minerais no contexto mais regional foram extraídos do SIG do Pará lançado em 2008 pela CPRM (Vasquez & Rosa-Costa 2008). Os dados em formato vetorial contém informações sobre a localização geográfica das ocorrências, substâncias primárias e secundárias, rocha hospedeira, rocha encaixante, tipo de alteração associada, entre outros atributos associados a cada ocorrência mineral. A Verena Mineração disponibilizou o levantamento topográfico que delineou a principal zona mineralizada.

1.5c - Dados do Radar R99B-SAR-SIPAM

O uso de radar de abertura sintética (SAR) é amplamente utilizado na extração qualitativa da informação, dada sua capacidade de penetração nos alvos, sendo sensíveis as variações morfológicas (Paradella *et al.* 1997).

Os dados do SIPAM foram cedidos pelo Prof. Dr. Álvaro Penteado Crósta e foram coletados para o Projeto Anapu-Tuere, realizado em 2005, com modo de imageamento Dual L+X. Os dados cedidos localizam-se na banda L, com polarização HH e a resolução espacial é de 6 metros e o tamanho do pixel 5 m.

1.5d - Equipamentos e Software

Os software manipulados foram Oasis Montaj 7.1, Envi 4.3, ArcGIS 9.3, com uso de extensões *Spatial Analyst* e *ArcSDM*.

2- 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 Verena sob co-orientação do Msc. Walid El Khoury Daoud. A liberação dos dados aerogeofísicos de alta resolução em uma área pouco conhecida na Amazônia Brasileira

e o início da fase de viabilidade econômica de um depósito de ouro em fase de cubagem estimularam a elaboração desta dissertação de mestrado.

A dissertação foi estruturada em duas partes. A primeira consiste do corpo principal do projeto, onde é apresentada uma introdução ao problema estudado, os objetivos da dissertação, um sumário do contexto geológico regional e mineralizações associadas. Optou-se por incorporar uma síntese dos resultados obtidos e uma discussão sobre as implicações na aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos na exploração mineral, bem como a utilização de técnicas de análise espacial na área em apreço. O intuito principal é o de integrar as informações principais obtidas e apontar os aspectos principais para a prospecção mineral em ambiente do tipo *greenstone belt* na Amazônia Brasileira.

O corpo principal dos resultados é apresentado na forma de dois artigos apresentado nos anexos 01 e 02 e intitulados: (1) ***Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos na caracterização geológico-geofísica do Terreno Granito-Greenstone Belt Três Palmeiras, Pará*** e (2) ***Modelagem Espacial de dados geofísicos e sua integração com dados geológicos para prospecção aurífera na região do Greenstone Belt Três Palmeiras, Pará.***

3- SINTESE DOS RESULTADOS

3.1 – Processamento dos dados multi-fonte

Objetivou-se utilizar técnicas de processamento para dados de aerogeofísica de alta resolução na tentativa de caracterizar unidades geológicas em áreas de difícil acesso e alto grau intempérico. Os métodos utilizados foram magnetometria gradiométrica e gamaespectrometria.

As principais vertentes deste tópico abordam uso da magnetometria gradiométrica e a produção de mapas de domínios estruturais e litogeofísico. Os resultados culminaram em um incremento no conhecimento geológico e na delimitação de novos alvos para a prospecção aurífera.

A magnetometria gradiométrica proporciona uma melhor definição de pequenas anomalias magnéticas localizadas entre as linhas de vôo e também de fontes lineares oblíquas à direção de aquisição (Reford 2006). A comparação entre os dados de

magnetometria tradicionais (produtos derivados calculados do campo magnético anômalo) e os gradientes medidos mostrou um ganho na definição espacial das fontes magnéticas mapeadas pelo método gradiométrico. Este método mostrou-se eficiente na delimitação de porções desmagnetizadas próximas a zonas cisalhadas que representam alvos de alteração hidrotermal e que representam guias prospectivos para ouro na área de estudo.

O mapa de domínios e lineamentos magnéticos, devido à cobertura vegetal, revelou-se uma ferramenta importante para o entendimento dos aspectos estruturais da área. A região apresenta uma predominância de lineamentos direção NW-SE concordantes com eventos regionais. A mineralização encontra-se associada a estas zonas de cisalhamento.

O refinamento da cartografia geológica proposta por Vasquez *et al.* (2008a) foi realizado após a análise dos produtos magnetométricos em e conjunto com os domínios gamaespectrométricos, interpretados sobre os canais de potássio, tório e urânio. O principal resultado é a redefinição das bordas dos corpos de rochas máficas e ultramáficas da Sequência Três Palmeiras, incluindo o mapeamento de novas porções a noroeste da área. Interessante salientar a definição dos corpos graníticos associados e variações internas, de acordo com as características físicas associadas ao terreno.

A caracterização da Sequência Três Palmeiras possui importância para a exploração, pois as mineralizações auríferas estão diretamente associadas ao contato granito-greenstone. Baseado nas características das áreas mineralizadas conhecidas mapeou-se as assinaturas geofísicas dos corpos hospedeiros e do ambiente mineralizado, a saber: baixa susceptibilidade magnética e associação com falhas de direção NW-SE, próximas ao cisalhamento principal.

A gamaespectrometria, associada ao modelo de elevação do terreno define as bordas dos corpos granitoides mapeados, difíceis de serem mapeados em campo. Os dados geofísicos permitiram ainda uma caracterização precisa do corpo mineralizado denominado Grota Seca, devido à alta concentração dos três radioelementos potássio, tório e urânio. Esta contribuição também resultou na descoberta de um novo corpo denominado Alto Alegre, mencionado no anexo 1.

3.2 – Análise espacial

Com intuito de auxiliar na seleção de áreas potenciais para ouro dentro da área recoberta pelo levantamento aerogeofísico, efetuou-se a análise espacial utilizando três abordagens metodológicas distintas: pesos de evidência; redes neurais e lógica fuzzy (Bonham-Carter 1994, Nykänen *et al.* 2006, Nykänen *et al.* 2007 b). Para efeito de comparação, aplicou-se a classificação Spectral Angle Mapper (SAM) considerando pontos mineralizados (Kruse *et al.* 1993, Miethke *et al.* 2007, Carrino *et al.* 2008).

Os dados utilizados para a geração dos modelos foram o mapa geológico interpretado a partir dos dados geofísicos, dados aerogeofísicos e análise de ouro em furos e geoquímica de solo. A área foi subdividida em dois blocos mineralizados, um denominado Bloco Norte, localizado no contato norte das rochas do greenstone belt com diorito e o Bloco Sul, no contato na borda sul das rochas do Greenstone Belt com granodiorito. A técnica peso de evidência foi aplicado no Bloco Norte, devido à quantidade mais expressiva de pontos de treinamento. Devido à situação inversa, optou-se pela lógica fuzzy para o Bloco Sul (Figura 19 do anexo 2). A classificação SAM foi aplicada aos dois blocos. Para a área total foi aplicada a técnica de redes neurais artificiais através do algoritmo RBFLN (*Radial Basis Functions*; Looney & Yu 2000). O resultado ilustra uma série de classes que mostram um arranjo espacial que reflete o arcabouço geológico da área. Este produto foi denominado de petromapa e permitiu a caracterização dos blocos mineralizados.

Para a aplicação da técnica SAM, redes neurais e pesos de evidência foram utilizados os canais K, Th, U e a amplitude do sinal analítico. Na primeira técnica analisou-se a assinatura de referência de dois pontos mineralizados conhecidos respectivamente no bloco norte e sul, sobre as coordenadas 396304/9603662 e 400548/9598304. Ambos os blocos foram satisfatoriamente mapeados. A aplicação no bloco sul mapeou dois novos corpos com mesma assinatura no contato granodiorito-*greenstone belt*. O petromapa, produto da rede neural, identificou características similares para cada porção mineralizada.

Para o cenário de favorabilidade mineral do bloco norte, utilizou-se como mapas evidenciais os três radioelementos K, Th e U, combinados com amplitude do sinal analítico. Todos foram reclassificados em binários e feito o calculo do peso de

evidência. Apenas as áreas consideradas como favoráveis para o modelo estão representadas em rosa. Os parâmetros de entrada na modelagem foram: i) probabilidade a priori: 0.015632, ii) pontos de treinamento: 15 e iii) unidade de área: 0,5 Km². O resultado corresponde satisfatoriamente ao bloco mineralizado, evidenciando a mineralização dos corpos Grota Seca e Ouro Verde e delimitando a borda do corpo diorítico.

Como apontado anteriormente, a técnica mais adequada para o Bloco Sul é a lógica *fuzzy*. Os dados utilizados foram amplitude do sinal analítico e o gradiente horizontal longitudinal, somados a mapa geológico gerado pela interpretação de dados oriundos da gamaespectrometria e o potássio anômalo. O potássio anômalo foi utilizado como identificador de zonas de alteração hidrotermal associada ao enriquecimento de potássio.

4- CONCLUSÕES

4.1 - Implicações na aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos na exploração mineral

Os dados geofísicos de alta resolução mostraram ser uma importante ferramenta para o mapeamento geológico em áreas com limitação natural e intemperismo elevado, como as regiões amazônicas.

Na área de estudo esta aplicação resultou na confecção do mapa de domínios e lineamentos magnéticos e do mapa litogeofísico, ambos em escala 1:100000, gerando um incremento de conhecimento no mapa geológico e auxiliando na cartografia geológica regional.

Os fatores estruturais e litológicos utilizados para a caracterização das mineralizações auríferas foram mapeadas através da integração de produtos geológicos e geofísicos. Os dados magnéticos foram capazes de mapear zonas de cisalhamento e falhas desenvolvidas ao longo de contatos geológicos entre unidades com contraste de competências. Destacam-se dentre os atributos magnéticos, os dados de gradientes medidos por sua eficiência em delimitar pequenos corpos, muitas

vezes obliterados com o uso da magnetometria convencional, adquirida apenas com um magnetômetro.

Foi caracterizada a assinatura do ambiente mineralizado, com a evidência de novas áreas para a Sequência Três Palmeiras e a caracterização da assinatura e delimitação dos corpos granitóides associados à mineralização. Os resultados obtidos mostram a eficiência desta ferramenta em áreas do tipo granito-greenstone belt mineralizados.

4.2 – Modelagem espacial e sua aplicação em terrenos do tipo greenstone belt na Amazônia

As técnicas de modelagem espacial em ambiente SIG são capazes de incorporar e integrar interpretações geológicas com dados multi-fontes, ampliando a capacidade previsional para mapas de prospecção resultantes de aplicação dessas técnicas.

Sabidamente a Sequência Três Palmeiras apresenta potencial para mineralização aurífera associada ao contato *greenstone belts* e os granitóides adjacentes. Deste modo, diversas técnicas foram propostas na tentativa não somente de mapear limites já conhecidos, como também indicar novas áreas de exploração.

O petromapa, produto da rede neural RBFLN, possibilitou a caracterização geológica da área e conseqüentemente do ambiente mineralizado. A caracterização dos blocos foi medida em função de 8 classes.

A técnica SAM apresentou bons resultados para a área nos dois modelos propostos, ressaltando áreas com respostas semelhantes à assinatura de referência mineralizado. A aplicação da técnica de peso de evidência (WofE) só foi possível para o bloco norte, onde a concentração de pontos de treinamento é maior. Após a reclassificação dos dados originais e aplicação do WofE o resultado apresentou bom desempenho na localização dos corpos mineralizados, englobando parcialmente os pontos sabidamente mineralizados e indicou regiões dentro do diorito do bloco norte como potenciais alvos.

O modelo de lógica fuzzy apresentado foi concebido após análise do comportamento do bloco sul. Esta modelagem associada à alteração hidrotermal e

zonas de cisalhamento ressaltou diversos corpos laterais ao conhecido pela empresa Verena, já sabidamente mineralizados em geoquímica de solo.

Deste modo, o sucesso na delimitação de áreas já conhecidas como mineralizadas e a indicação de novas regiões reduziu significativamente às áreas em exploração. A qualidade dos modelos foi testada através de análises estatísticas e observações geradas durante o mapeamento geológico e prospecção na região. Todos os modelos foram efetivos na delimitação de áreas já conhecidas como mineralizadas e na seleção de novos alvos, reduzindo as áreas de exploração e auxiliando na tomada de decisão para a alocação de novos furos e malhas de geoquímica.

5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGNERIAN H. 2005 Technical Report on the Volta Grande gold proprieties- Prepared by Verena Minerals Corporation. Relatório Técnico p. 120
- AGTERBERG F.P. & CHENG Q. 2002. Conditional Independence Test for Weights-of-Evidence Modelling. Natural Resources Research, **11(4)**: 249 – 255.
- AN P., MOON W.M., RENCZ A. 1991. Application of Fuzzy set theory to integrated mineral exploration. Canadian Journal of Exploration Geophysics, **27(1)**: 1-11
- BARROS C. E. C. M., MACAMBIRA M.J.B., SANTOS M.C.C.S., SILVA D.C., PALMEIRA, L.C.M., SOUSA M.M. 2007. Estruturas sinmagmáticas e idade de zircão de granitos (evaporação de Pb) paleoproterozóicos da parte leste do domínio Bacajá, Província Maroni Itcaíunbas. Rev. Bras. Geoc., **37(2)**: 293-304.
- BLUM M.L.B. 1999. Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 229p.
- BONHAM-CARTER G.F. BROWN W.M., GEDEON T.D., GROVES D.I., BARNES R.G. 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists – Modelling with GIS. Pergamon, 400p.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT D.F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **54(11)**: 1585-1592
- BRIGGS I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics, **39**: 39-48.
- CARNEIRO C.C., CRÓSTA A.P., SILVA A.M., PINHEIRO R.V.L. 2006. Fusão de Imagens Altimétricas e Aeromagnetométricas como Ferramenta de Interpretação Geológica, Exemplo da Província Mineral de Carajás (PA). Revista Brasileira de Geofísica, **24(2)**: 261-271.
- CARRINO T.A., SOUZA FILHO C.R., LEITE E.P. 2008. Cartografia do potencial de Au-Pd-Pt e EGP-Cr-Ni na região de Serra Leste (Carajás) utilizando-se a técnica ACP e classificadores hiperespectrais. Rev. Bras. Geoc., **38**: 502-514

- CORDANI U.G., TASSINARI C.C.G., TEIXEIRA W., BASEI M.A.S., KAWASHITA K., 1979. Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. *In: Congresso Chileno de Geología 2, Actas, vol. 4, p.137–148.*
- CUNHA E.R.S.P., SANTOS A.R., PARADELLA W.R.; C. E. M. BARROS, VALE A.G., VENEZIANI P. 2006. Integração de Dados de Radar, Aerogamaespectrométricos e Geológicos nos Domínios do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geoc., 36 (1) : 327-335,*
- DAOUD W.K. 2005. Relatórios internos Verena Mineração sobre mineralização aurífera no Volta Grande do Xingu.
- FARACO M.T.L., VALE A.G., SANTOS J.O., LUZARDO R., FERREIRA A., OLIVEIRA M., MARINHO P.A.C. 2005. Levantamento Geológico da Região ao Norte da Província Carajás. *In: Horbe A. M. C. & Souza W. S. (Org.) Contribuições à Geologia da Amazônia, v. 4, p.: 32-47.*
- HOLLIDAY J.R., COOKE D. R.2007. Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits. *Ore Deposits and Exploration Technology. Paper 53.*
- JORGE JOÃO X. da S., VALE A.G., LOBATO T. de A.M.1987. Altamira: folha SA.22-Y-D, Estado do Pará. Texto explicativo, escala 1:250.000. Brasília: DNPM/CPRM, 1987. 31 p.
- KRUSE F.A., LEFKOFF A.B., BOARDMAN J.B., HEIDEBRECHT K.B. SHAPIRO A.T., BARLOON P.J., GOETZ A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment, 44:145-163.*
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. 2007. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Área Volta Grande. Volume I.
- LOONEY C.G, YU H., 2000. Special software development for Neural Network and Fuzzy Clustering analysis in Geological Information Systems. Geological Survey of Canada, 34p.
- MACAMBIRA M.J.B., SILVA D.C.C., BARROS C.E.M., SCHELLER T. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a paleoproterozoic terrain in the region at the north of the Carajas Mineral Province. *In: South American Symposium on Isotope Geology (SSAGI), v. 4. p. 205-207*

- MACAMBIRA M.J.B., BARROS C.E.M., VASQUEZ M.L., SILVA D.C.C. 2004. Investigação do limite Arqueano-Paleoproterozóico ao norte da Província de Carajás, Amazônia Oriental. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, p. 97-99.
- MAGALHÃES, L.A. 2008. Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações auríferas na região de Amapari (Amapá) Dissertação de Mestrado. Campinas, SP. 120 p.
- MIETHKE C., SOUZA FILHO C.R., SILVA A.M. 2007. Assinatura geofísica e modelos prospectivos 'knowledge-driven' de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul Cráton São Francisco, MG. *Rev. Bras. Geoc.*, **37(3)** : 490-503
- MINTY B.R.S. 1991. Simple Micro-Levelling For Aeromagnetic Data. *Expl. Geoph.* **22**:591-592.
- NÓBREGA R.P., SOUZA FILHO C.R. 2003. Análise espacial guiada pelos dados (data-driven: o uso de redes neurais para a avaliação do potencial poli-minerálico na região centro-leste da Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, **33(2)**: 111-120.
- NÓBREGA R.P. 2001. Análise espacial "knowledge-driven" e "data-driven": o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 72p.
- NYKÄNEN V., OJALA V.J. 2007a. Spatial analysis techniques as successful mineral-potential mapping tools for orogenic gold deposits in the Northern Fennoscandian Shield, Finland. *Natural Resources Research* **16 (2)**: 85–92.
- NYKÄNEN V., RAINES G.L., SALMIRINNE H., OJALA J., EILU P. 2006. Spatial modelling as a tool for mineral prospectivity analysis in Finland. *In*: Peltonen, P. & Pasanen, A. (eds.) *The 27th Nordic Geological Winter Meeting, January 9–12, 2006, Oulu, Finland: Abstract Volume. Bulletin of the Geological Society of Finland. Special issue (1), 113 p.*
- NYKÄNEN V.M., OJALA V.J. 2007b. Spatial data mining techniques as mineral exploration tools: examples from gold exploration in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *In*: Andrew et al. (eds.) *Digging deeper: Proceedings of the Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Dublin, Ireland 20th–23rd August 2007. Dublin: Irish Association for Economic Geology, p. 481–484.*

- PARADELLA W.R., SILVA M.M.Q .2005. MAPSAR: Um Radar Orbital para Aplicações na Amazônia. *Infogeo*, v. 7, n. 36, p. 34-36.
- PARADELLA W.R, SANTOS A.R., VENEZIANI P., MORAIS M.C. 2000. Synthetic Aperture RADAR for Geological Applications in the Moist Tropics: Experiences from the Brazilian Amazon Region. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:1-10
- PIRES A.C.B., SILVA C.A., MORAES R.A.V., FRANCO H.A., SILVA L.G. 2005. Classificação de corpos intrusivos na região de Coromandel (MG) com apoio de dados magnéticos e gamaespectrométricos: resultados preliminares. *In: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante e II South American Symposium on Diamond Geology*. Diamantina, MG, v. 1. p. 117-120.
- QUADROS T.F.P., KOPPE J.C., STRIEDER A.J., COSTA J.F.C.L. 2003. Gamma-ray data processing and integration for lode-Au deposits exploration. *Natural resources research*, vol. 12, p. 57-65
- REFORD S., 2006. Gradient enhancement of the total magnetic field: The Leading Edge, **25 (1)**: 59-66.
- RICCI P.S.F. et al. 2003. The reanalysed Carajás Block is interposed between the Bacajá (the crustal reworking “lost link” now being predicted) and Rio Maria Archean terranes – Guaporé Craton. *In: Simp. Geol. da Amazônia, 8. Resumos expandidos*. CD ROM
- RICCI P.S.F. 2006. Rocks of the Pium-Área, Carajás Block, Brazil - a deep-seated high-T gabbroic pluton (charnockitoidlike) with xenoliths of enderbite gneisses dated at 3002 Ma – the basement problem revisited. *In: Simp. Geol. da Amazônia, 9. Resumos expandidos*. CD ROM
- SANTOS J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C, Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (eds.) Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, mapas e SIG*. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. p.169-226.
- SAWATZKY D.L., RAINES G.L., BONHAM-CARTER G.F. 2009. Spatial Data Modeller. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/sdm/>. Acessado em: Setembro 2009.
- SILVA A.M., PIRES A.C.B., MCCAFFERTY A.E., MORAES R.A.V. 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration studies in the uneven exposed terrains of the Rio das Velhas Greenstone Belt. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 33, 2003.

- SILVA A. M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195 p.
- SOUSA C.S. de, SILVA R.C.S. 2007. Integração de dados aerogeofísicos (magnetometria) e de sensores remotos para a extração de lineamentos da região ao norte de Carajás, Província Maroni-Itacaiúnas. *In.*: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.p.2199-2206.
- SOUZA FILHO C.R., CRÓSTA A.P.2003. Geotecnologias Aplicadas à Geologia. *Rev. Bras. Geoc.*, **33 (2)**: 1-4
- TASSINARI C.C.G. 1996. O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 139 p.
- TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B.1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22(3)**:174-182
- TASSINARI C.C.G., BETTENCOURT J.S., GERALDES M.C., MACAMBIRA M.J.B., LAFON J.M., 2000. The Amazonian Craton. *In*: Cordani U.G., Milani E.J., Filho A.T., Campos D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41–95.
- TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B., 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. *In*: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, pp. 471–485.
- TEIXEIRA A.A., SILVA A.M., Pires A.C.B., Moraes R.A.V., Souza Filho C.R. 2006 . Integração e análise de dados aerogeofísicos através da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: O exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**: 559-572
- TEIXEIRA W., TASSINARI C.C.G., CORDANI U.G., KAWASHITA K., 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*. **42**:213–227.
- THOMSON S., FOUNTAIN D., WATTS T. 2007. Airborne Geophysics – Evolution and Revolution. *Exploration . Paper 2. Plenary Session: The Leading Edge*.

- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., ARMSTRONG R.A. 2008. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research* **16**:1279–302
- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., GALARZA M. A.2005. Granitóides Transamazônicos da Região Irixi-Xingu, Pará: Novos dados geológicos e geocronológicos. *In*: Horbe A.M.C., Silva Souza V. da (Org.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. v. 4, p. 16-31.
- VASQUEZ M.L., ROSA COSTA L.T., SILVA C.M.G, KLEIN E.L.2008. Compartimentação Tectônica (Geologia e recursos Minerais do Estado do Pará). *In*: Vasquez, M.L.; Rosa-Costa, L.T. (Org.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Belém: CPRM, v., p. 39-112.
- VASQUEZ M.L. 2006. Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: Evolução crustal da porção meridional da Província Maroni Itacaiúnas - sudeste do Craton Amazônico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 234p.
- VERYASKIN A.V. 2001 Magnetic gradiometry: a new method for magnetic gradient measurements. *Sensors & Actuators: A. Physical*, p.233-235.

ANEXO 1

**APLICAÇÃO DE DADOS MAGNÉTICOS GRADIOMÉTRICOS E
GAMASPECTROMÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA
DO TERRENO GRANITO-GREENSTONE BELT TRÊS PALMEIRAS, PARÁ.**

APLICAÇÃO DE DADOS MAGNÉTICOS GRADIOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA DO TERRENO GRANITO-*GREENSTONE BELT* TRÊS PALMEIRAS, PARÁ.

(Artigo Submetido Revista Brasileira de Geofísica)

Abstract

This paper presents a method for geological mapping in highly weathered terrains using derivative products of high-density airborne geophysical data and their integration with geological data. The airborne survey employed gamma-ray spectrometry and a three gradiometric magnetometer configuration to improve the accuracy and resolution of the magnetic field. The approached region is a cratonic area located in Para state. This area comprises a *greenstone belt* sequence and granitoids with an important metallogenic potential. The new products allowed a better definition of important geological features. The derivative products were grounded checked to examine the efficiency of the magnetic and gamma-ray responses to delineate geological domains. The magnetometric maps provided information to the structural framework and about specific lithological units like mafic and ultramafic bodies, while the gammaspectrometric data brought strong insights about lithologies, helped better define geological contacts and tectonic structures. These products integrated with geological data mapped the favorable settings for the known gold mineralization, that represent a combination of structural and lithologic factors. The magnetic data were able to map shear zones and faults developed along lithologic contacts between units of contrasting competencies.

Resumo

O presente trabalho ilustra as vantagens do uso da magnetometria gradiométrica e gamaespectrometria de alta resolução para áreas de difícil acesso e alto grau intempérico, bem como o seu potencial para cartografia geológica e aplicação na exploração mineral. A área localiza-se no em estudo o terreno granito-greenstone Três Palmeiras na região amazônica que apresenta potencial para mineralizações auríferas. Os produtos derivados comprovaram a eficiência das respostas magnéticas e gamaespectrométricas para delimitar domínios geológicos. Os mapas de domínio e lineamentos magnéticos forneceram informações para a compreensão estrutural e mapeamento de unidades máficas e ultramáficas, enquanto os dados gamaespectrométricos aprimoraram a litológica, ajudando em uma melhor definição contatos geológicos e estruturas tectônicas. Estes produtos integrados com dados geológicos possibilitaram o mapeamento de zonas favoráveis para o ouro, que representam uma combinação de fatores estruturais e litológicos. Os dados magnéticos realçaram zonas cisalhamento e falhas desenvolvidas ao longo de contatos entre as unidades de competências contrastantes.

Palavras Chave

Aerogeofísica de alta resolução, Terreno *Granito-Greenstone Belt*, cartografia geológica

INTRODUÇÃO

A região amazônica apresenta limitações naturais que dificultam a aquisição de informações geológicas de campo, as quais incluem um espesso e contínuo perfil de solos desenvolvido sobre o substrato rochoso, provocando uma escassez de afloramentos naturais. Em áreas de floresta amazônica, dados de sensoriamento remoto do tipo SAR e de geofísica aeroportada são, em geral, a melhor alternativa para substanciar e expandir espacialmente as informações geológicas obtidas no campo (Paradella *et al.* 1999, Cunha *et al.* 2006, Carneiro *et al.* 2006). Neste contexto, destaca-se a aerogeofísica, por contribuir efetivamente na ampla visualização da distribuição e configuração espacial das unidades litológicas e estruturas tectônicas, que se solidificou como uma importante ferramenta de apoio à exploração mineral (Silva 1999, Pires *et al.* 2005, Paradella *et al.* 2005, Souza & Silva 2007).

Os métodos magnéticos e radiométricos consolidando-se como ferramenta nas etapas de pré-campo, sendo aceito como indicador litológico e detector mineral, com enorme potencial, incrementando a qualidade dos mapas geológicos (Thomson *et al.* 2007). Esta última década foi marcada por significativos avanços tecnológicos na geofísica, resultando na evolução nos métodos de aquisição, interpretação e visualização dos dados. A aquisição com altura mais próxima ao terreno e espaçamento reduzido entre as linhas de vôo permitiu uma melhor identificação dos parâmetros geofísicos medidos (Thomson *et al.* 2007, Holliday & Cooke 2007). Inúmeras melhorias continuam sendo implementadas, tais como metodologias para amostragem com uso de múltiplos sensores para determinação dos gradientes magnéticos. Estes gradientes permitem uma melhor definição do parâmetro medido, intensificando a qualidade das informações a serem interpoladas entre linhas de vôo (Thomson *et al.* 2007). A gradiometria proporciona, assim, uma melhor definição de pequenas anomalias magnéticas localizadas entre as linhas de vôo e também de fontes lineares oblíquas à direção de aquisição (Reford 2006).

O Craton Amazônico é uma fronteira para a exploração mineral devido à sua rica diversidade litológica e vasto potencial mineral. A área de estudo, localizada às margens do Rio Xingu (PA), é conhecida como hospedeira de mineralizações aurífera associadas ao *Greenstone Belt* Três Palmeiras (Figura1). Este *greenstone belt*

representa as supracrustais neoproterozóicas do Domínio Bacajá, compreendendo corpos alongados no *trend* WNW–ESSE (Faraco *et al.* 2005, Ricci 2006, Vasquez 2008). A mineralização aurífera encontra-se associada às zonas de cisalhamento, localizadas nas sequências do *greenstone belt*. Este tipo de mineralização é definido por Groves *et al.* (2003) como complexo de veios de composição carbonato-quartzo com significativa continuidade vertical, associada a rocha hospedeira. Destaca-se ainda a associação espacial com zonas de cisalhamento, em estruturas compressoriais ou transpressionais.

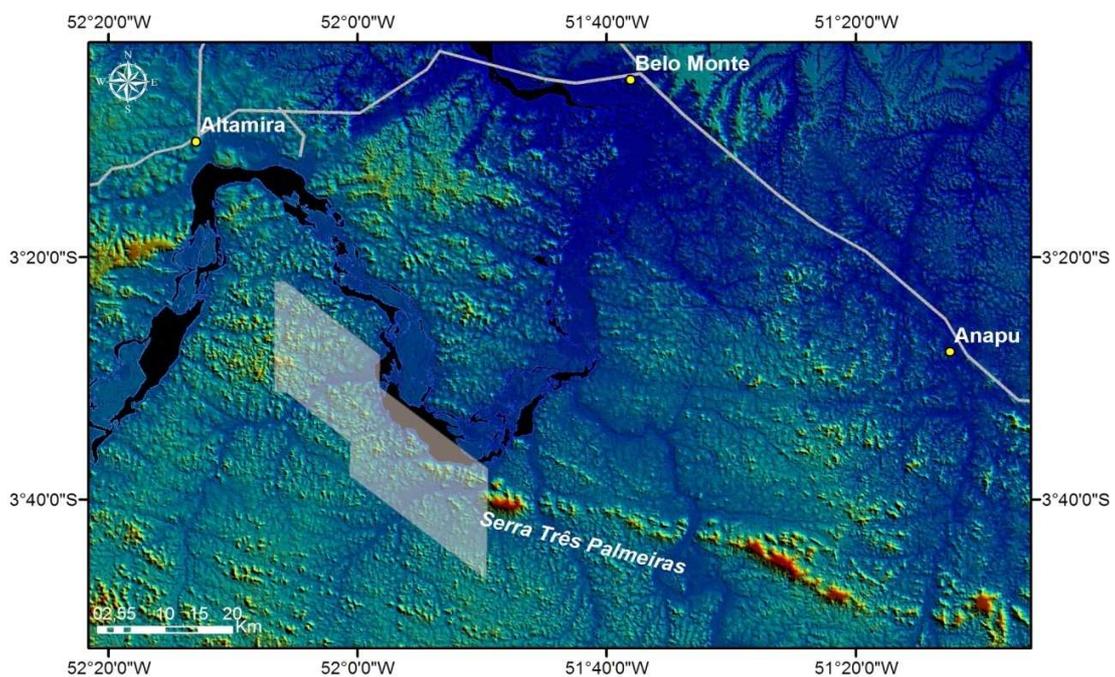


Figura 1 – Localização da área em estudo, delimitada pelo polígono branco. A porção denominada Volta Grande do Xingu localiza-se porção centro-nordeste do estado do PA. Destaca-se ainda a localização da principal feição geomorfológica da área Serra Três Palmeiras, onde localizam-se as rochas metavulcânicas do Greenstone Belt Três Palmeiras e a mineralização aurífera.

O principal objetivo deste artigo é ilustrar as vantagens do uso da magnetometria gradiométrica e gamaespectrometria de alta resolução para aéreas de difícil acesso e de alto grau intempérico, bem como o seu potencial para cartografia geológica e

aplicação na exploração mineral. Representa um estudo de caso que pode auxiliar a tomada de decisão em áreas semelhantes.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área em estudo, denominada Volta Grande do Xingu localiza-se na porção oeste do Domínio Bacajá, inserido na Província Transamazonas (Santos 2003) ou Província Maroni-Itacaiúnas (Tassinari & Macambira 1999) do Craton Amazônico. Seus limites são a oeste a Província Amazônia Central e o Bloco Carajás. A norte é recoberto pela bacia sedimentar fanerozóica Amazônica e a leste é bordejado pelas rochas supracrustais neoproterozóicas do Cinturão Araguaia.

O embasamento do Domínio Bacajá é composto por ortognaisses, paragnaisse, ortogranulito e migmatito, cujas rochas ocorrem maciças e com enclave em granitóides (Vasquez *et al.* 2005).

Estudos regionais mais recentes foram elaborados por Vasquez *et al.* (2008) e Barros *et al.* (2007). Jorge João *et al.* (1987) e Faraco *et al.* (2005) classificaram a região em associações formais litoestratigráficas. Vasquez *et al.* (2008) agrupou em seis associações litológicas diferenciadas. Sua classificação estabelece seis associações distintas: ortognaisses, rochas metassedimentares, ortogranulitos, sequências metavulcanosedimentares, granitóides e rochas charnoquíticas (Figura 02).

O ortognaisse, datado entre 2671 ± 3 e 2440 ± 1 Ma (U-Pb SHRIMP e evaporação de Pb em zircão (Vasquez *et al.* 2008a)) é representado por rochas claras e escuras bandadas, contendo *boudins* de ortoanfibolitos, sendo localmente migmatizadas. As rochas metassedimentares, cuja idade é estimada entre 2361 e 2076 Ma (Evaporação de Pb em grão de zircão) (Vasquez *et al.* 2005), compreendem metapelitos, metapsamitos e rochas metacalcisilicáticas, com estruturas migmatíticas e *boudins* associados a granulitos máficos.

Os ortogranulitos são derivados de gnaisses e *granofels* de metatonalitos e granodioritos, associados com charnoquitos e paragnaises. Eles se encontram deformados e milonitizados em zonas de cisalhamento.

Os batólitos de granitóides apresentam-se alongados, paralelos à transcorrência de zonas de cisalhamento NW–SE. São distintos granodioritos, dioritos, tonalitos e monzogranitos com textura porfiroclástica e granular. O intervalo de idades, aferido por

diversos autores, varia entre 2215 ± 2 e 2069 ± 6 Ma (Santos 2003, Vasquez *et al.* 2005, Faraco *et al.* 2005, Macambira *et al.* 2003, Macambira *et al.* 2001, Souza *et al.* 2003 in Vasquez 2008). As rochas charnoquíticas constituem corpos alongados na direção E-W de composição variando de charnoquítica a enderbítica, com mangeritos associados. Vasquez *et al.* (2008) redefiniu o Monzogranito Belo Monte (Santos 2003) como um plúton charnoquítico de 2086 ± 5 Ma (U–Pb SHRIMP).

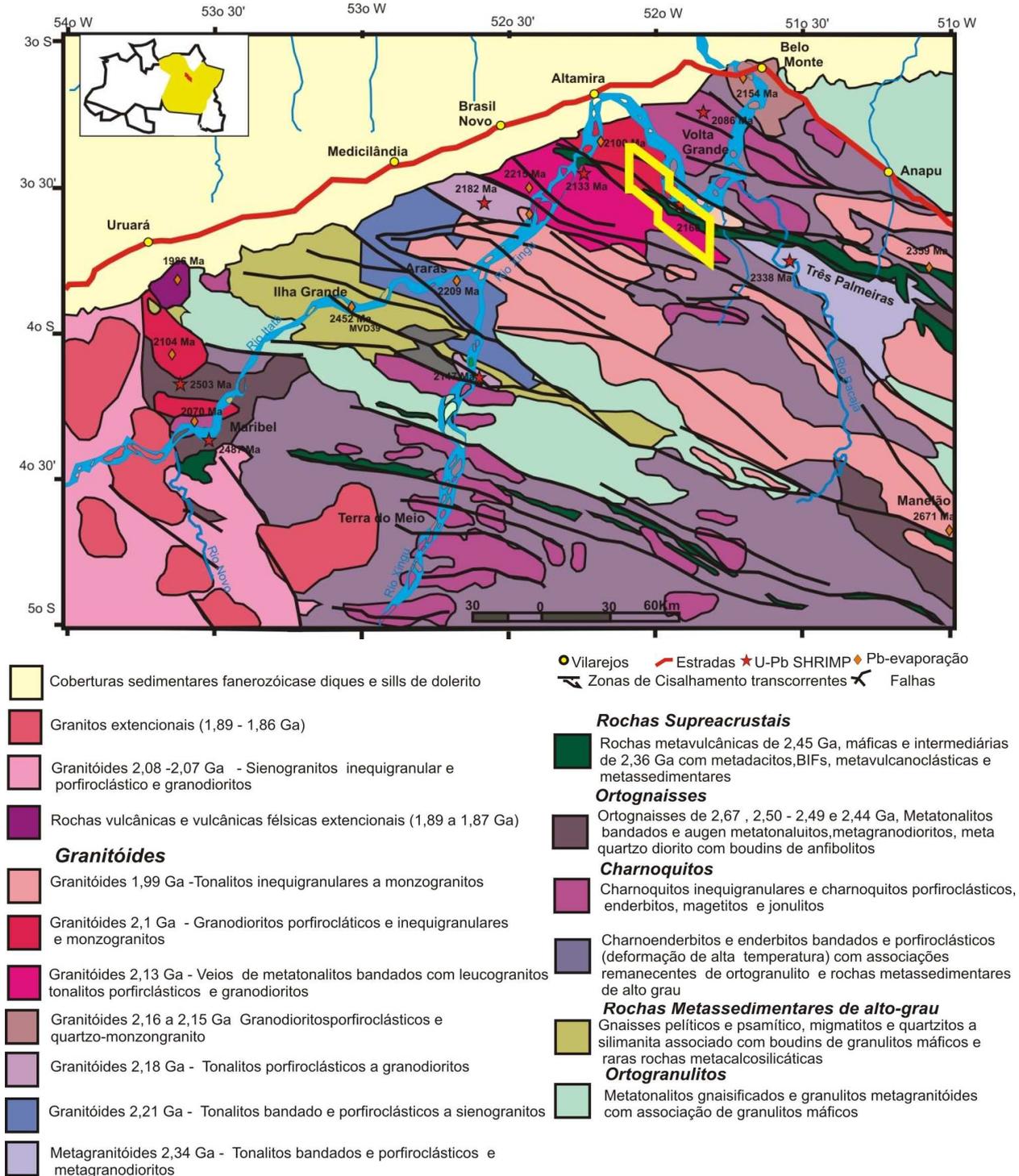


Figura 02 – Mapa geológico da porção leste do Domínio Bacajá (Vasquez *et al.* 2008a). O polígono amarelo representa a área de estudo.

. Na área em estudo, destaca-se o *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Esta sequência foi subdividida por Jorge João *et al.* (1987) em unidade metavulcânica máfica, denominada Anfibolito Itatá e rochas metavulcanoclásticas, rochas metavulcânicas félsicas intermediárias, e rochas metassedimentares químicas e clásticas agrupadas como Micaxisto Bacajá, (Jorge João *et al.* 1987, Vasquez *et al.* 2008a). A unidade encontra-se balizada por zona de cisalhamento, originando cataclasitos e milonitos (Faraco *et al.* 2005). Vasquez *et al.* (2008) obtiveram em metaandesito a idade de 2359 ± 3 Ma, obtida pelo método de evaporação Pb em zircão.

As unidades geológicas estruturam-se segundo NW-SE e WNW-ESSE, caracterizando uma tectônica transcorrente, marcada por extensas zonas de cisalhamento, paralelas e contínuas (Faraco 2001, Faraco 2005). Barros *et al.* (2007) definiu para a região leste do domínio Bacajá uma foliação penetrativa com direção entre N60°W a WNW-ESSE com mergulhos altos.

O modelo de mineralização segue o apresentado por Groves *et al.* (2003) como um depósito do tipo orogenético associado a *greenstone belt*. Tais depósitos possuem destaque pelos volumes que variam entre 1 a 10 Mzo Groves *et al.* (2003). Daoud (2005) compilado por Agnerian (2005) sugerem as regiões mineralizadas como zonas tabulares, alongadas na direção NWN-ESSE, atingindo até 300m de largura e zonas silicificadas mineralizadas com espessura entre 2m e 10m, possuindo mergulho geralmente subverticais (Figura 3). Estas zonas estão confinadas ao contato entre granitóides e a seqüência do *greenstone belt*, como exemplificado na seção S-9A (Figura 4).

Os controles da mineralização são estruturais e hidrotermais. O cisalhamento da área é ilustrado na Figura 5. Existem cinco tipos de alteração hidrotermal na área: silicificação, sulfetação, cloritização, carbonatação e potassificação, sendo a mineralização associada às duas primeiras. Os tipos de alteração citados podem ser observados nas Figuras de 6 a 8. Os maiores teores ocorrem nas zonas silicificadas e associadas a milonitos sobre a forma de vênulas (Figura 9).

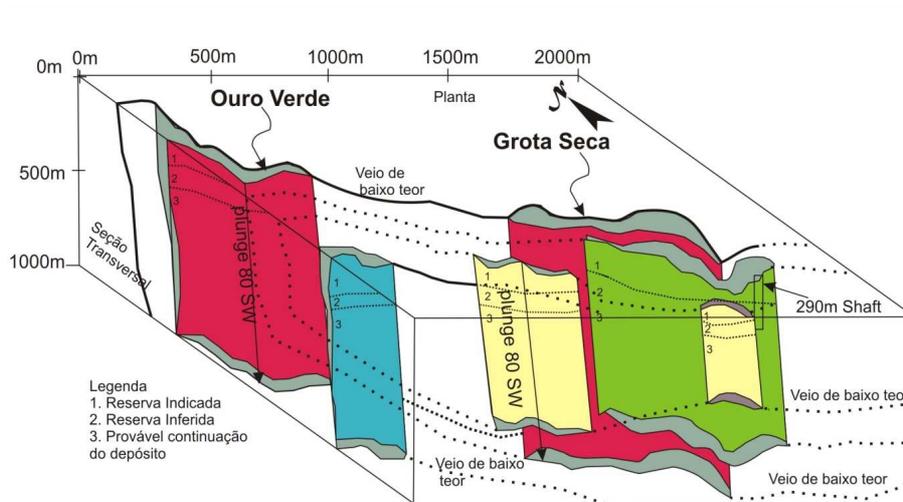


Figura 3 - Bloco diagrama dos corpos mineralizados da área representando os blocos tabulares seguindo o trend regional.

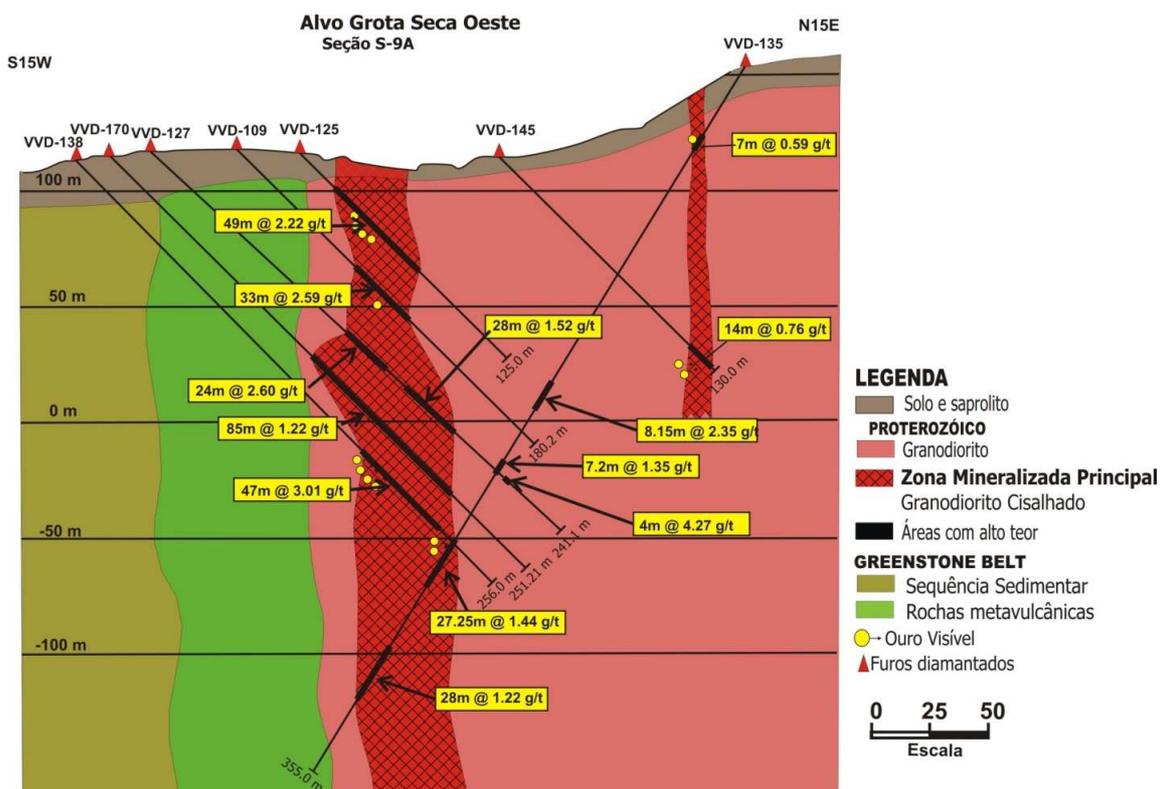


Figura 4 – Seção transversal exemplificando o modelo para a mineralização na área do projeto Volta Grande. O ouro, muitas vezes visível, concentra-se em regiões próximas ao contato das supracrustais do *greenstone belt* com granodiorito e são marcadas por zonas cisalhadas e silicificadas.



Figura 5 - Perfil de alteração em saprólito, destacando intenso cisalhamento em rocha metavulcânica da Sequência Três Palmeiras. Nota-se também o contato entre um corpo metavulcânico com rocha mais silicática.



Figura 6 – Veio de quartzo em diorito. Nota-se alterações hidrotermais potássicas, silificação e sulfetação, evidenciadas pela presença de feldspato potássico, quartzo e pirita respectivamente.

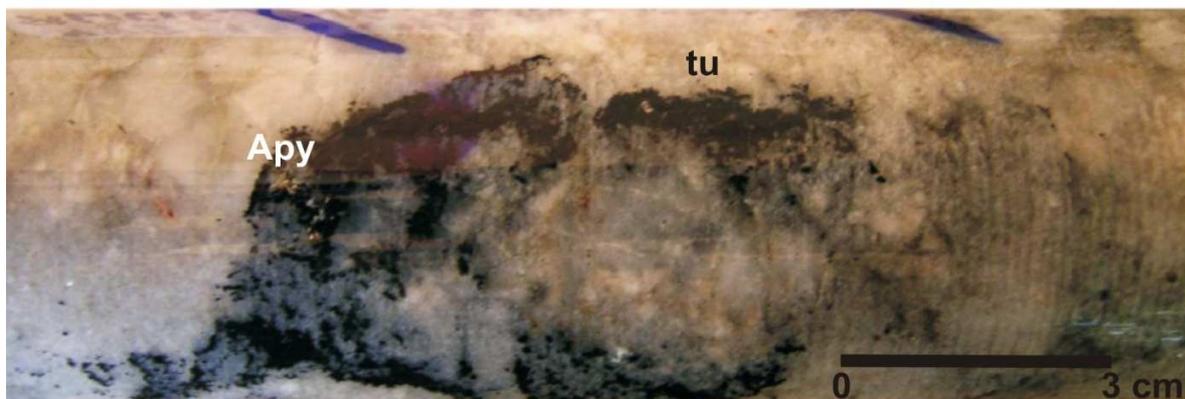


Figura 7- Furo de sondagem destacando a mineralização aurífera em granodiorito. Nota-se a presença de arsenopirita e turmalina em veios de quartzo.



Figura 8- Brecha hidrotermal com matriz fina composta por clorita, evidenciando alteração por cloritização.

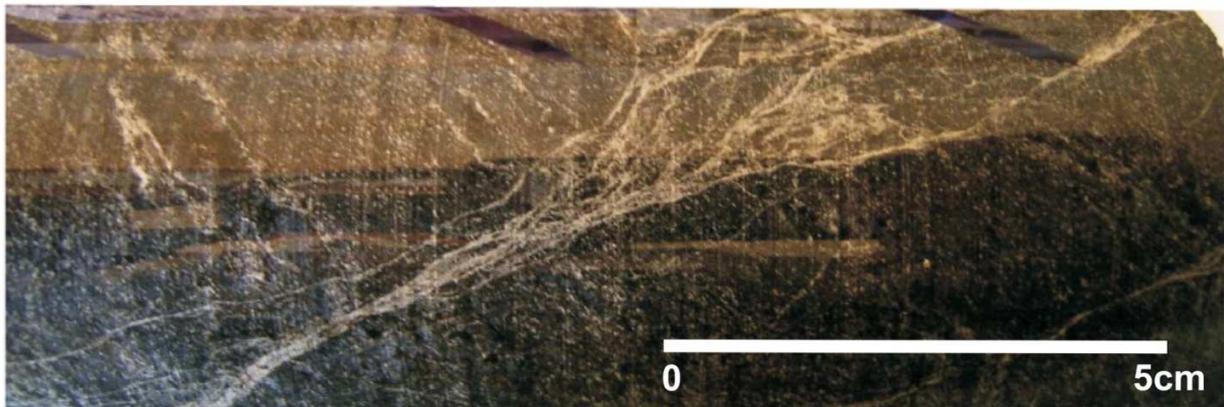


Figura 9 – Milonito cortado por vênulas discordantes, associado a ouro invisível. Estas vênulas possuem orientações ora concordante ora discordante da foliação.

Dois blocos associados a granitóides intrudidos na sequência *greenstone* foram mapeados pela empresa Verena como mineralizados (Figura 10). O primeiro localizado a norte é de composição diorítica e foi dividido em dois corpos de minério denominados Grotta Seca e Ouro Verde. A sul, o bloco é denominado Granodiorito Itatá.

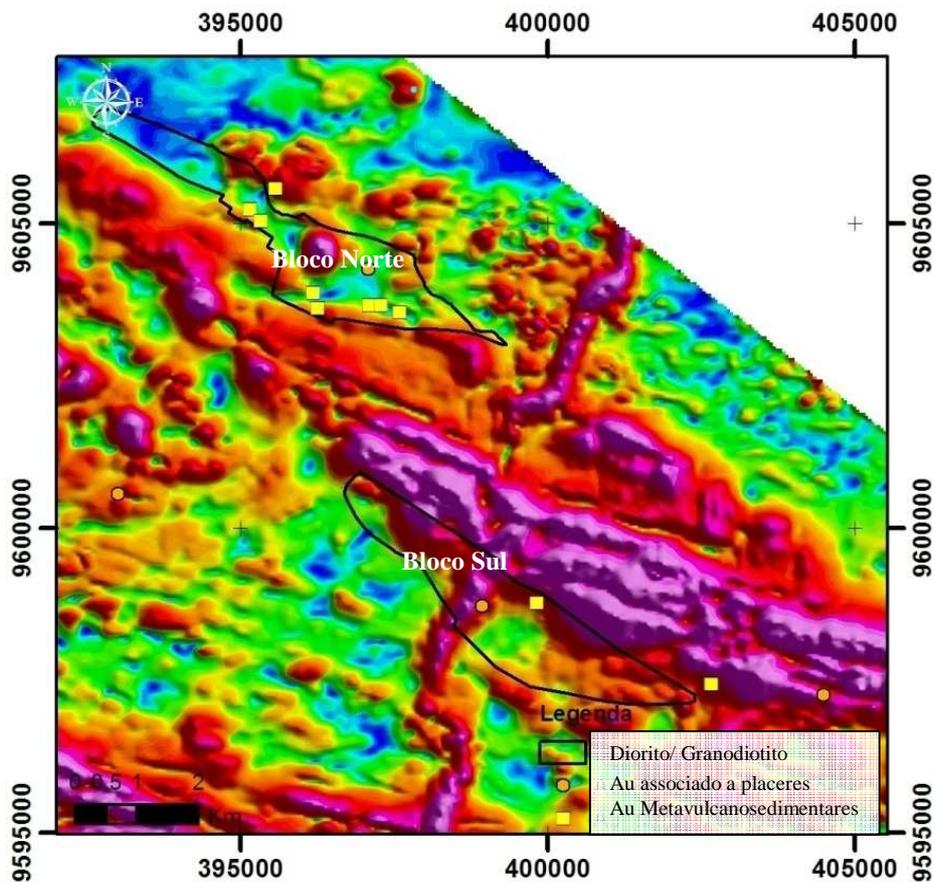


Figura 10- Localização dos blocos mineralizados estudados pela empresa Verena. Notar associação entre regiões com contraste entre alta amplitude do sinal analítico e as mineralizações descritas como associadas a rochas metavulcanossedimentares (Vasquez et al. 2008b), representadas como polígonos amarelos.

A carta metalogenética divulgada pela CPRM cita ambiente favorável para ouro, estanho e tungstênio. Faraco *et al.* (2005) reportam mineralizações de ouro e sheelita associados a xistos máficos e anfibólitos. Jorge *et al.* (1987) por sua vez destacam a presença de cassiterita aluvionar em rios que drenam o Anfibólito Itatá.

NATUREZA DOS DADOS ESTUDADOS

Aerolevantamento – Caracterização

Os dados geofísicos são oriundos de um aerolevantamento efetuado pela empresa LASA em junho de 2007 para a empresa Verena. O levantamento aerogamaespectrométrico e aeromagnético gradiométrico recobriu a área do projeto Volta Grande e seu entorno, totalizando aproximadamente 555 Km² e 3.087 km lineares de perfis de alta resolução.

As linhas de vôo foram executadas na direção N-S, com espaçamento de 200m e as linhas de controle perpendiculares com espaçamento de 2000m. As medidas de intensidade magnética e canais radiométricos foram tomadas com sobrevôo a 100 m de altitude.

O sistema aeromagnético utilizado é constituído por três sensores de vapor de céσιο Scintrex, modelo CS-3, com resolução de 0,001 nT, adquiridas com taxa de amostragem de 10 Hz. O gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820, de 256 canais espectrais, com dois conjuntos de cristais (NaI) de 1024 polegadas cúbicas cada (*downward looking*) e dois cristais, de 256 polegadas cúbicas cada (*upward looking*), com taxa de detecção por segundo (LASA 2007). O processamento inicial destes dados foi realizado pela empresa LASA, por meio do Oasis Montaj versão 6.4 da GEOSOFT e Atlas Manager da Fugro Airborne Surveys (LASA 2007).

Processamento dos dados aerogeofísicos

As etapas conduzidas neste trabalho visam o realce dos dados aerogeofísicos originais e a geração de produtos derivados para aplicação na área de estudo. Os procedimentos metodológicos adotados seguem os utilizados em Silva (1999) e Blum (1999), utilizando o software Oasis Montaj 7.0.1 da Geosoft.

Avaliou-se a distribuição espacial dos dados primários e a presença de inconsistências, tais como picos acentuados (*spike*). Os dados do levantamento, inicialmente distribuídos de forma irregular, foram interpolados visando à criação de malha regular. O procedimento inicial baseia-se no estabelecimento do tamanho ideal da célula da grade em função do espaçamento entre as linhas de vôo. No presente trabalho, utilizou-se o método de interpolação de curvatura mínima (Briggs 1974). Para

melhorar ainda o resultado das interpolações, aumentou-se o número de interações para 500 e 1000. As células foram interpoladas com $\frac{1}{4}$ do espaçamento da linha de vôo (25m). Para a remoção de ruídos consistentes paralelos às linhas de vôo, aplicou-se a técnica de micronivelamento (Minty 1991, Blum 1999, Silva 1999).

DADOS MAGNÉTICOS

Os mapas magnetométricos auxiliam com informações estruturais em subsuperfície e realçam além de contatos, litologias específicas, como por exemplo, rochas de unidades máficas e ultramáficas, comumente magnéticas e demais unidades não magnéticas.

A magnetometria gradiométrica é uma ferramenta para aplicações onde as características do campo magnético produzido pelas fontes de anomalias são importantes. Na última década inúmeros esquemas gradiométricos foram empregados (Veryaskin 2001). A configuração de três magnetômetros, localizados nas asas e fuselagem, aumentam a acurácia e a resolução do gradiente magnético. Os gradientes horizontais lateral (perpendicular à direção da linha de vôo) e longitudinal (ao longo da linha de vôo) geram maior informação do campo magnético nos intervalos entre as linhas adquiridas (Redford 2006). Para o estabelecimento dos gradientes os valores coletados pelo sistema da aeronave (diferenças DX e DY) são divididos pelas distâncias entre sensores que definem a dimensão dos eixos X e Y, gerando o Gradiente Horizontal Lateral (GRX) (Figura11) e Gradiente Horizontal Longitudinal (GRY) (Figura12) (LASA 2007). A amplitude do sinal analítico (Figura13) é uma importante ferramenta para o mapeamento de borda de corpos sendo empregada em conjunto com os gradientes na delimitação dos corpos magnéticos da região.

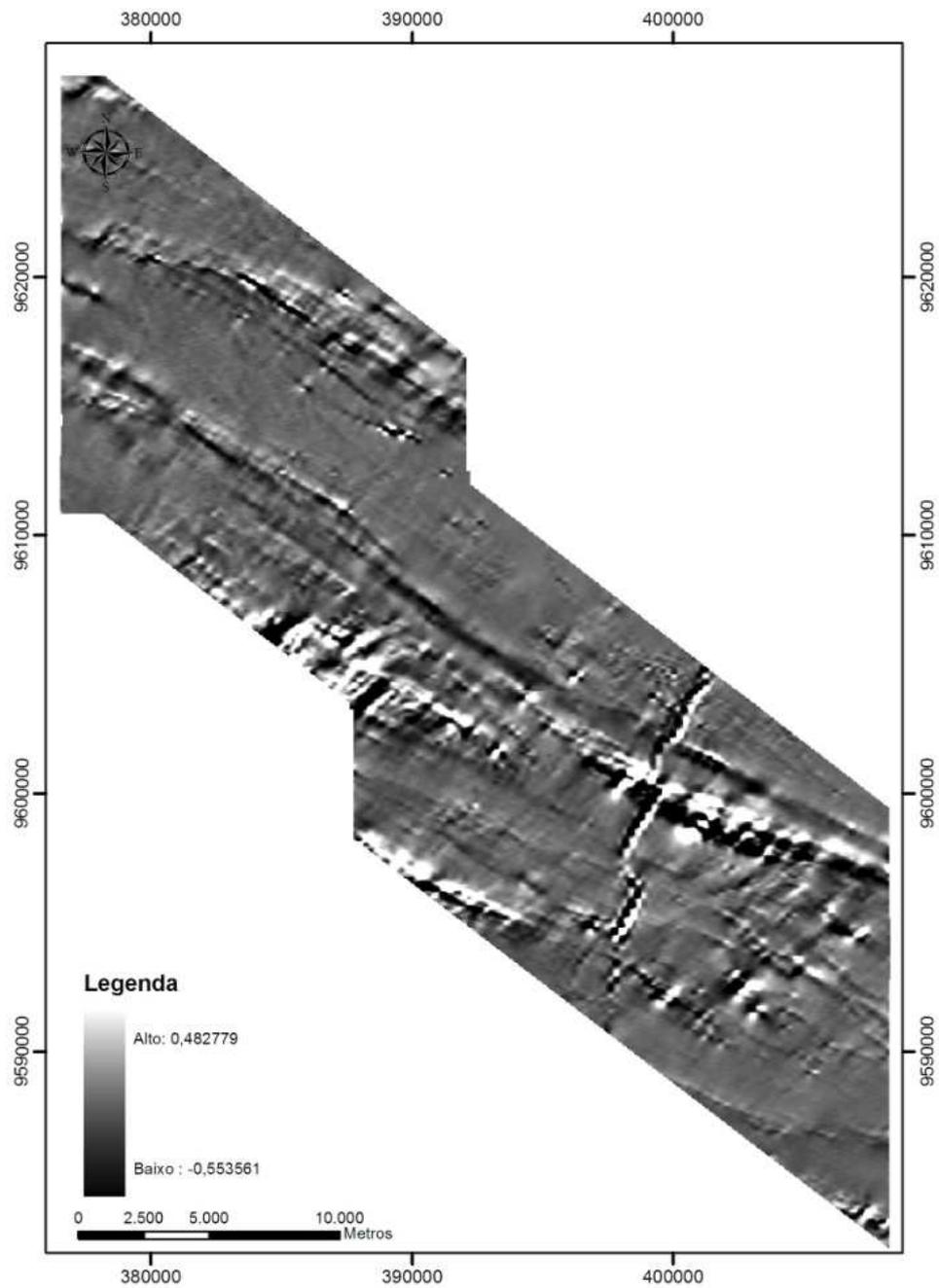


Figura 11 - Gradiente Horizontal Lateral (GRX) em escala de cinza para a área em estudo.

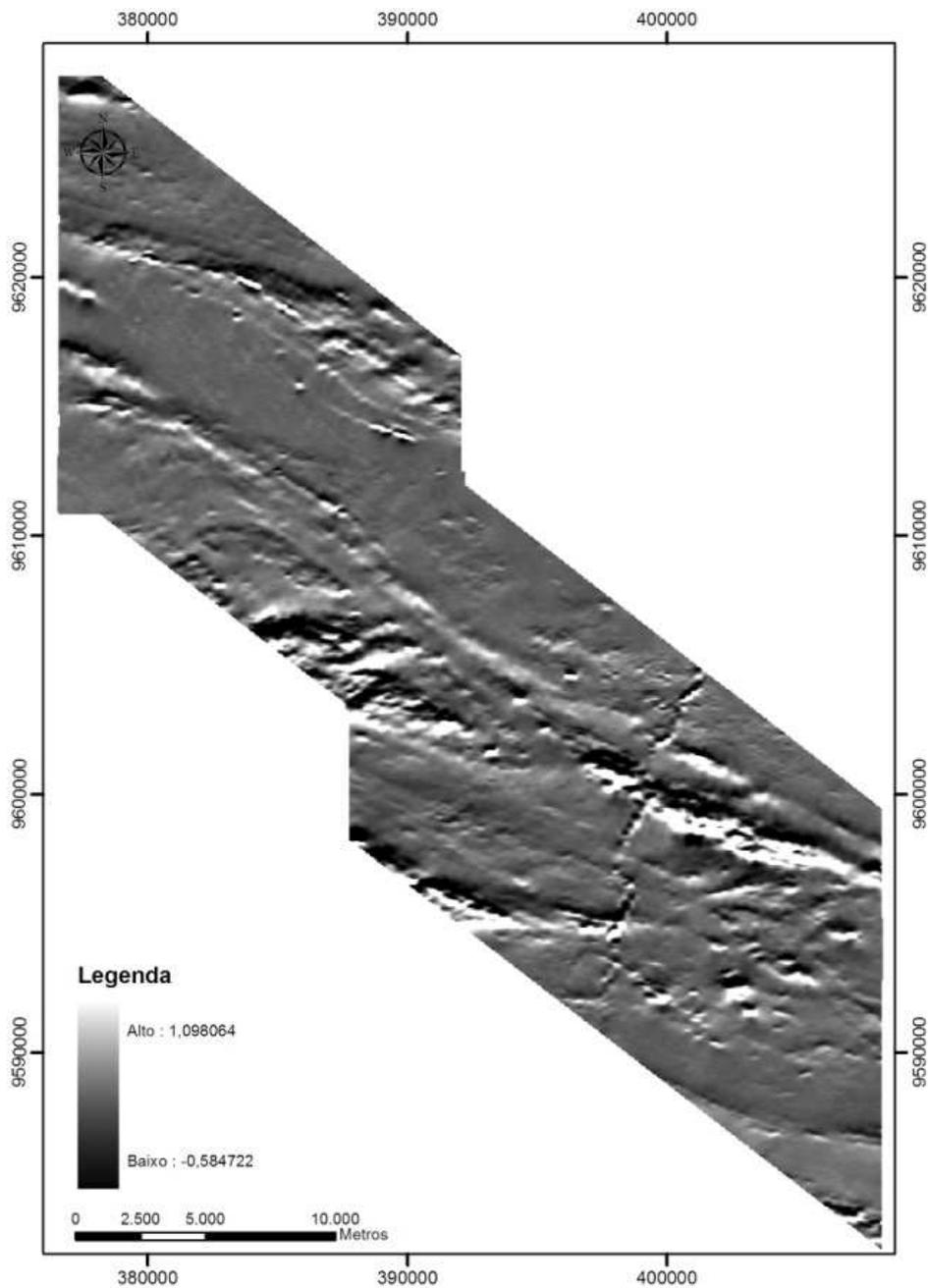


Figura 12 - Gradiente Horizontal Longitudinal (GRY) em escala de cinza para a área em estudo.

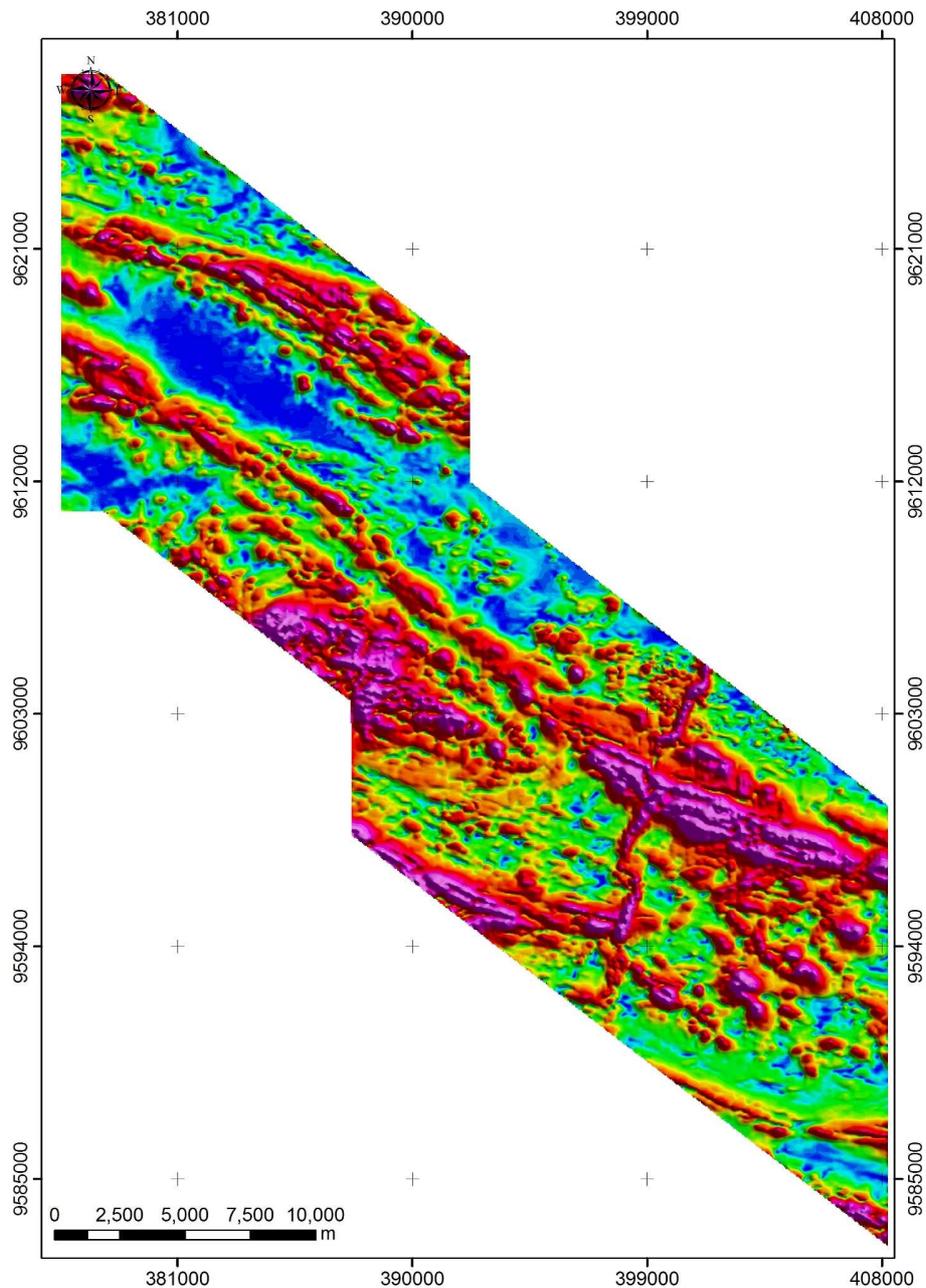


Figura 13 – Amplitude do sinal análico do campo magnético anômalo.

Os principais produtos gerados encontram-se ilustrados na Figura 14. Os procedimentos adotados para a interpretação dos dados magnetométricos seguiram o fluxo descrito: (i) análise do campo magnético total; (ii) cálculo das derivadas horizontais do campo magnético anômalo em x (D_x) e em y (D_y); derivada vertical do campo magnético anômalo (D_z) e a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), (iii) análise do

gradiente horizontal lateral (GRX) e gradiente horizontal longitudinal (GRY); (iii) interpretação dos lineamentos magnéticos, (iv) delineamento de domínios com respostas magnéticas similares; (v) elaboração de mapa integrado para as integração com dados geológicos.

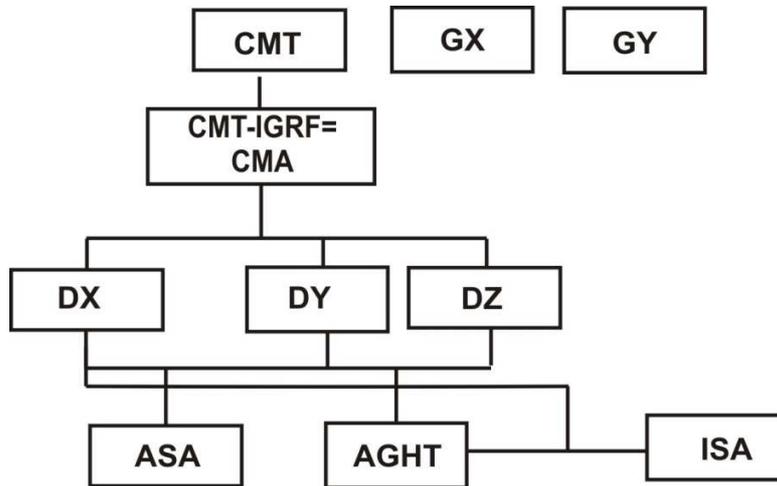


Figura 14 – Fluxograma ilustrando as principais etapas de realce e processamento dos dados magnéticos, bem como a extração dos domínios e estruturas magnéticas. **CMT- Campo Magnético Total CMA-** – Campo Magnético Anômalo, **DX** – Primeira derivada Horizontal em X, **DY** – Primeira Derivada Horizontal em Y e **DZ** – Primeira Derivada Vertical e **ASA** – Amplitude do Sinal Analítico de ordem zero, **AGHT** – Amplitude do Gradiente horizontal total. **ISA-** Inclinação do Sinal Analítico e **GX-** Gradiente horizontal lateral e **GY-** Gradiente horizontal longitudinal.

DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

A gamaespectrometria que se baseia no decaimento dos radioelementos potássio e filhos do tório e urânio é uma ferramenta difundida para o auxílio geológico (litologia e estrutural), sendo comumente utilizada como um mapeamento geoquímico de baixo custo e rápida aquisição (Thomson *et al.* 2007). Em geral, há uma boa correlação entre as unidades em mapas geológicos e os radioelementos mapeados (Silva 1999, Silva *et al.* 2003, Quadros *et al.* 2003).

O fluxograma dos principais produtos gamaespectrométricos assim como a etapas de processamento encontram-se sintetizadas na Figura 15. Foram extraídos dados de contagem total, que representam a medida total da radioatividade do

espectro dos raios gama e para os canais dos radioelementos potássio (K), tório (Th) e urânio (U). O cálculo de razões entre canais (U/K, Th/K e U/Th) permite uma idéia de enriquecimento relativo. Composições em falsa cor criadas a partir das cores primárias aditivas no espaço do RGB (*Red* - vermelho, *green* - verde, *blue* - azul) e do CMY (*Cian* - ciano, *magenta* - magenta e *yellow* - amarelo) são utilizadas para realçar e combinar as três bandas (canais de K, eTh, eU) em uma única imagem. Na imagem RGB as regiões com altos teores apresentam-se branca e negra em região com baixos teores. A combinação de RGB e CMY com o uso do modelo digital de terreno (MDT) visa o estudo da influência do relevo sobre a distribuição destes elementos.

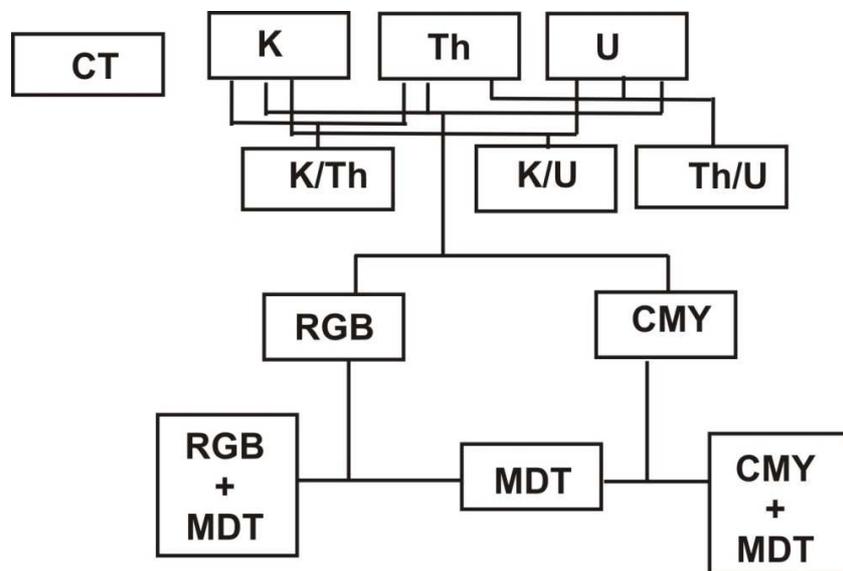


Figura 15 – Fluxograma exibindo as etapas de realce e interpretação dos domínios aerogamaespectrométricos; K – canal de potássio em percentagem; eTh – canal do equivalente de tório em ppm; eU – canal do equivalente de urânio em ppm; eTh/K – razão do equivalente de tório e potássio, eU/K – razão do equivalente de urânio e potássio, eU/eTh – razão do equivalente de urânio pelo equivalente de tório; RGB – composição ternária em falsa cor R (canal de K), G (canal de Tório), B (canal de Urânio) (Figura 16); CMY – composição ternária em falsa cor CMY, C (canal de K), M (canal de Tório), Y (canal de Urânio); MDT – modelo digital de terreno da geofísica. RGB + MDT – Integração da composição ternária colorida em falsa cor RGB com o modelo digital de terreno da geofísica no canal de intensidade. CMY + MDT – Integração da composição ternária colorida em falsa cor CMY com o modelo digital de terreno da geofísica no canal de intensidade.

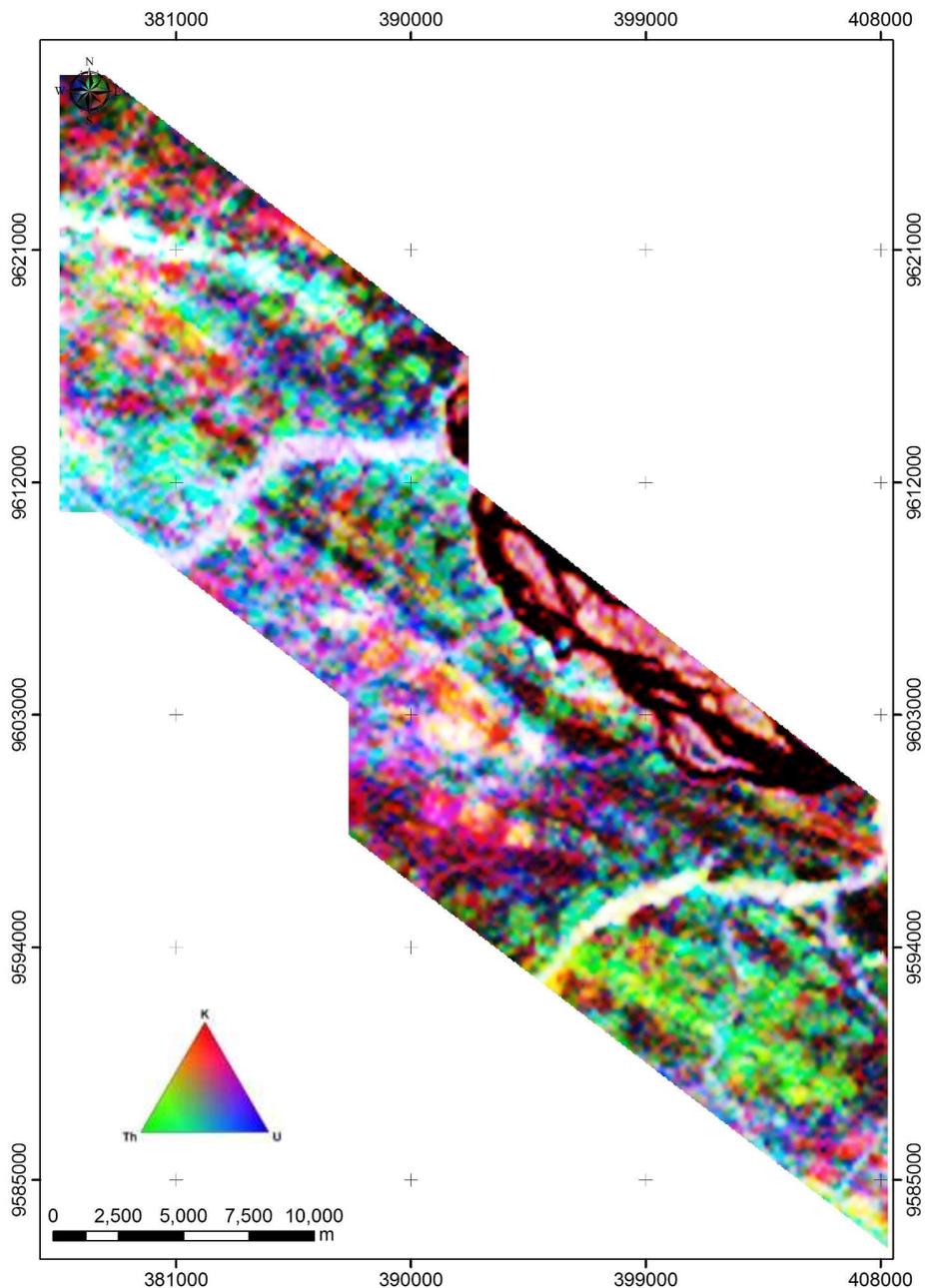


Figura 16 – Composição ternária RGB para os canais gamaespectrométricos. (Red = Potássio, Green = Tório e Blue = Urânio).

Para os dados gamaespectrométricos realizou-se: (i) comparação das imagens correspondentes a cada canal discriminado (K, eTh e eU) 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; (iii) uso de composições em falsa cor (imagem ternária) do tipo RBG e CMY, com os canais de K, Th e U, para

definição de unidades com assinaturas gamaespectrométricas semelhantes; (iv) cálculo das razões U/Th, Th/K e U/K na análise da sua correlação com os diversos domínios gamaespectrométricos e com as regiões onde estão mapeadas as mineralizações na região; (v) classificação hierárquica desses temas na elaboração do Mapa de Domínios Gamaespectrométricos ou Mapa Litogeofísico.

A interpretação qualitativa das imagens gamaespectrométricas geradas para o projeto foi efetuada em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG). Objetivaram-se separar diversas unidades gamaespectrométricas presentes na área em estudo através de classificação hierárquica dos polígonos delineados pela interpretação visual. O produto principal foi um mapa de domínios gamaespectrométricos, onde cada domínio representa uma combinação da variação dos radioelementos, classificados em alto, médio e baixo para cada um dos três radioelementos.

INTERPRETAÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS

A interpretação objetivou a demarcação de padrões que individualizassem unidades com comportamento distinto e padrões de assinaturas que pudessem traduzir feições importantes na área de interesse na exploração mineral. Foram analisados separadamente dados magnetométricos e gamaespectrométricos.

Realce das estruturas através da magnetometria

A interpretação demarcou lineamentos magnéticos e domínios magnéticos, a partir dos produtos derivados como amplitude do sinal analítico e gradientes horizontal lateral (GRX) e horizontal longitudinal (GRY). Esta análise foi efetuada na escala 1:100.000 (Figura17). Os lineamentos magnéticos são bem marcados na direção NW-SE e subordinadamente na direção NE-SW. Dados da literatura indicam uma tectônica transcorrente marcada por extensas zonas de cisalhamento NW-SE e WNW-ESE, paralelas e contínuas, com deformação dúctil (Ricci 2003 *in* Vasquez 2006). Estas zonas são bem marcadas nos diversos produtos derivados do campo magnético anômalo e nos gradientes medidos, tanto em superfície quanto em subsuperfície.

Os resultados permitiram o mapeamento de quatro domínios magnéticos, a saber: D1 - caracterizado por assinaturas que refletem os menores valores de gradiente e estão localizadas na porção noroeste da área; D2 – domínio que refletem os valores com baixas amplitudes; D3 - valores médios e que na área de estudo possui ampla distribuição espacial e D4 – com os maiores valores de amplitude. Os dois últimos domínios configuram corpos alongados NE-SW.

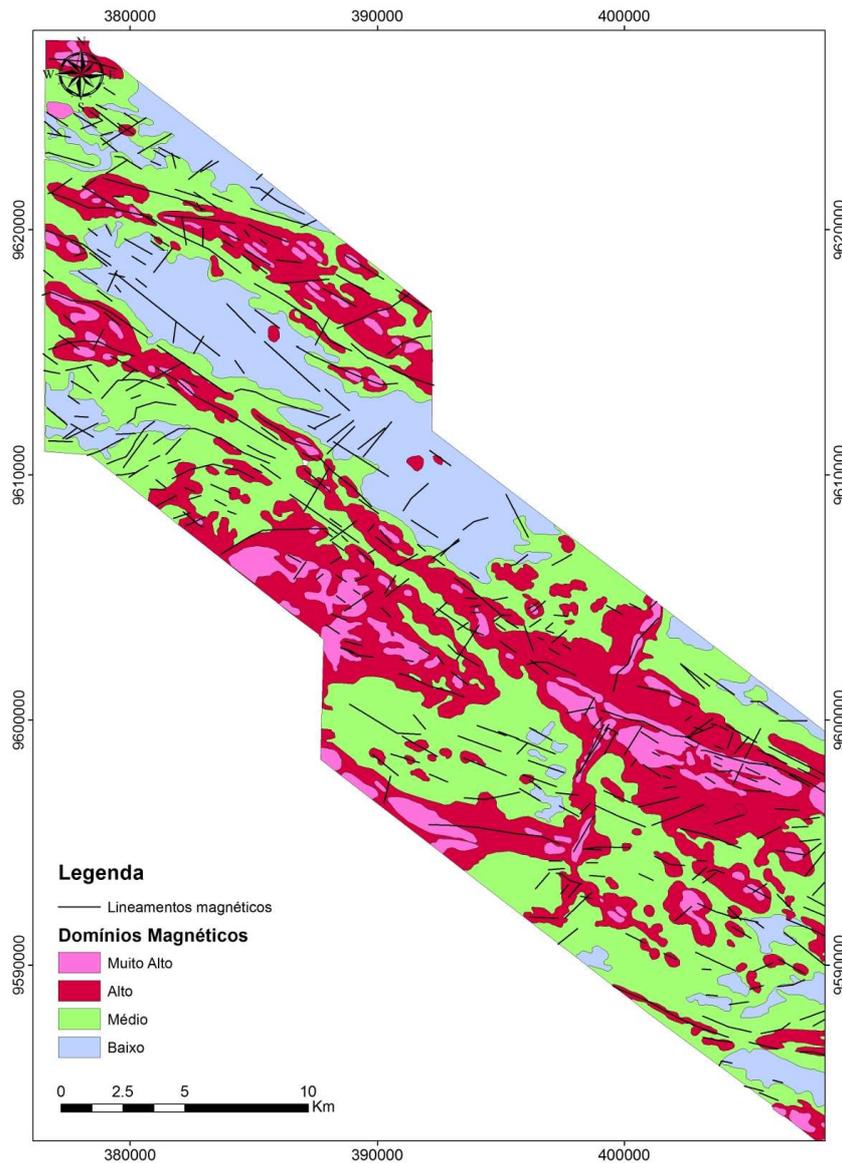


Figura 17 – Mapa integrado dos domínios e lineamentos magnéticos. Destaca-se o predomínio evidente da direção NE-SW, concordante com o trend regional e a resposta magnética mais alta concentradas com essa direção.

Delimitação dos domínios gamaespectrométricos

O mapa litogeofísico foi interpretado a partir da composição ternária RGB (K, eTh, eU) e integrado com o modelo digital de terreno e auxiliado pela análise das razões, resultando na caracterização de bordas e contatos entre os domínios. Para esta interpretação foram individualizados 26 domínios, baseados na variação de radioelementos (Figura 18).

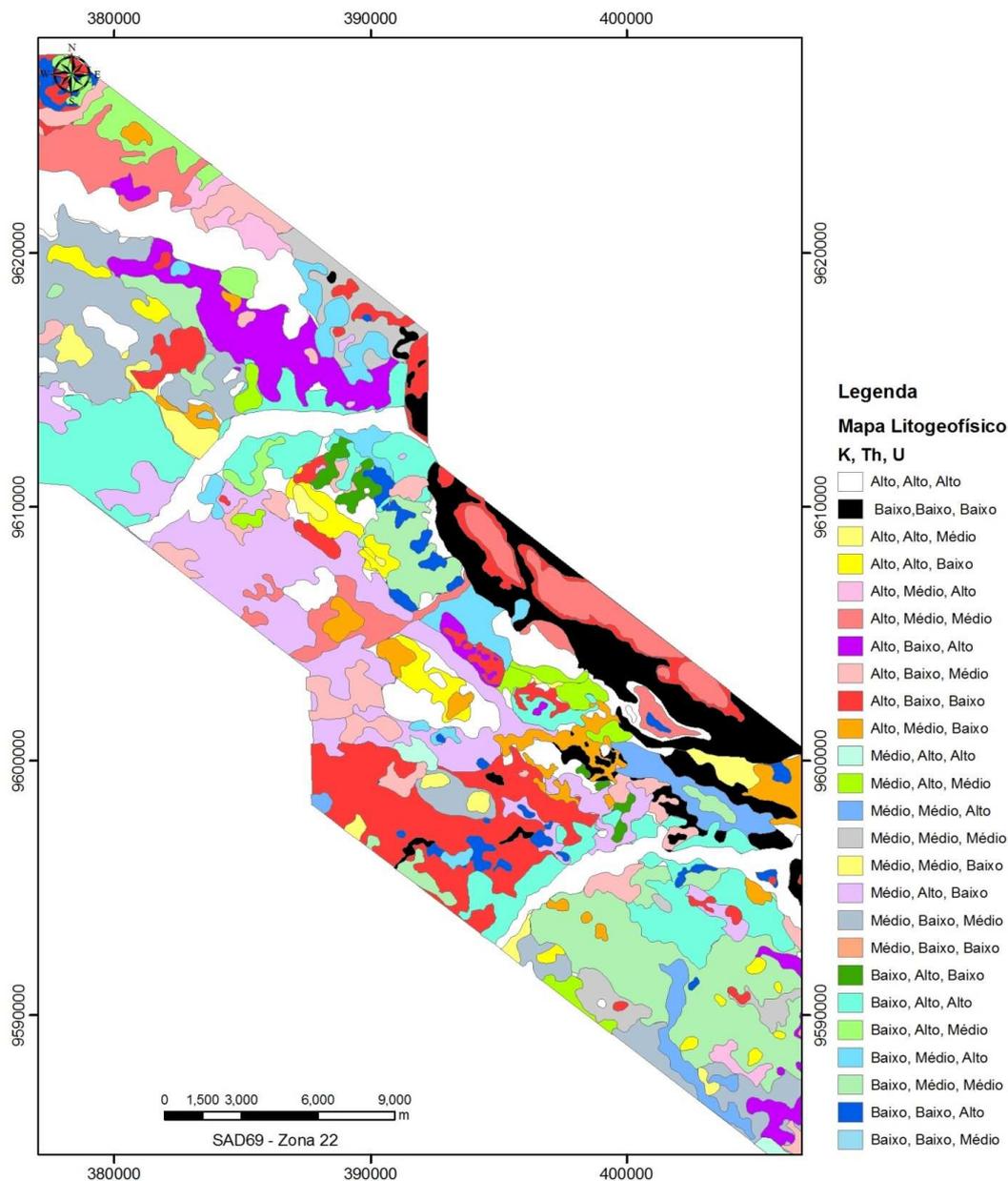


Figura 18 - Mapa litogeofísico para a região do Volta Grande, em escala 1:100000.

Adicionalmente, efetuou-se uma análise integrada em ambiente SIG utilizando o módulo de redes neurais dentro do algoritmo *Spatial Data Modeler* (SDM) com o intuito de gerar um mapa litogeofísico de forma automática, aqui denominado de Petromapa (NYKÄNEN 2009).

As redes neurais artificiais são modelos computacionais distribuídos, paralelos, adaptativos e inspirados no raciocínio humano (Brown *et al.* 2000, Nóbrega 2003). A composição das redes é baseada em conceito de neurônios, que são elementos computacionais associados a pesos para cada conexão. Desta forma, este mapa será o resultado da combinação de camadas de entrada (mapas evidenciais), uma camada de saída (resultado), e uma ou duas camadas ocultas, contendo a função que irá determinar os coeficientes numéricos a serem associados aos neurônios, permitindo a sua classificação (Figura 19). Esta aplicação da técnica é especialmente interessante devido à habilidade em extrair padrões ocultos em conjuntos de dados que podem ser imperceptíveis aos humanos e as técnicas estatísticas tradicionais; sem a necessidade de conhecimento prévio de características específicas do dado (Brown *et al.* 2000, Nóbrega & Souza Filho 2003, Magalhães 2008).

O petromapa consiste representa a integração de várias propriedades físicas que auxiliam na redefinição de domínios geológicos e variações internas, de forma eficiente. O resultado corresponde a um produto na escala regional de semi-detalhe.

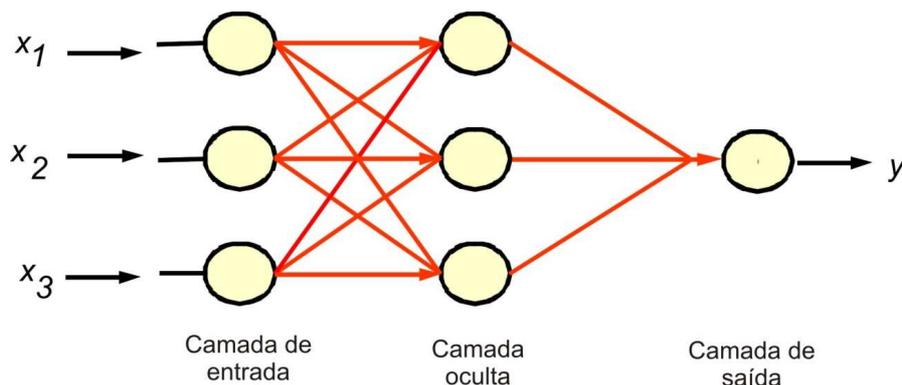


Figura 19 - Arquitetura da rede neural artificial do sistema *Probabilistic Neural Networks* (PNN)

Para a geração do Petromapa da área de estudo propõe-se um modelo utilizando como mapas evidenciais os três canais individuais da gamaespectrometria e a amplitude do sinal analítico como representante da magnetometria. Optou-se por utilizar o algoritmo RBFLNs (*Radial Basis Functions*; Looney & Yu, 2000) e o *software Geoexplorer* para o treinamento da rede. Foram obtidos 1000 pontos randômicos, utilizados como ponto de treinamento.

Este mapa proporcionou a individualização de 8 (oito) classes através do processamento (Figura 20). As classes 5 e 8, localizadas na porção centro-sul da área, delimitam o contato a assinatura caracterizada como do embasamento e as das rochas do *greenstone belt*. Nesta porção, a classe 5 representa áreas de alta amplitude do sinal analítico e predomínio de urânio e tório. Já a classe 8 mostra baixa amplitude magnética e altos valores dos radioelementos k, eTh e eU. O domínio 6 possui forte destaque para a área a norte com alto dos três radioelementos e com a definição de um domínio com altos valores de radioelementos e porções de alta amplitude. O domínio 1, representando baixos valores nos três radioelementos e alta amplitude do sinal analítico, mapeia com fidelidade o corpo central alongado e indica novas áreas: a extremo sudeste da área, complementado com pequenos corpos esparsos e a noroeste com uma pequena faixa próxima ao Rio Xingu (Figura 21). A região estudada possui uma alta percentagem de área associada aos domínios 2 e 3. É possível através deste produto uma definição mais precisa na diferenciação entre os granitos adjacentes ao *greenstone*, excetuando-se as porções já comentadas sobre o domínio das classes 5 e 8. O diorito mineralizado, a norte da assinatura característica, é bem marcado.

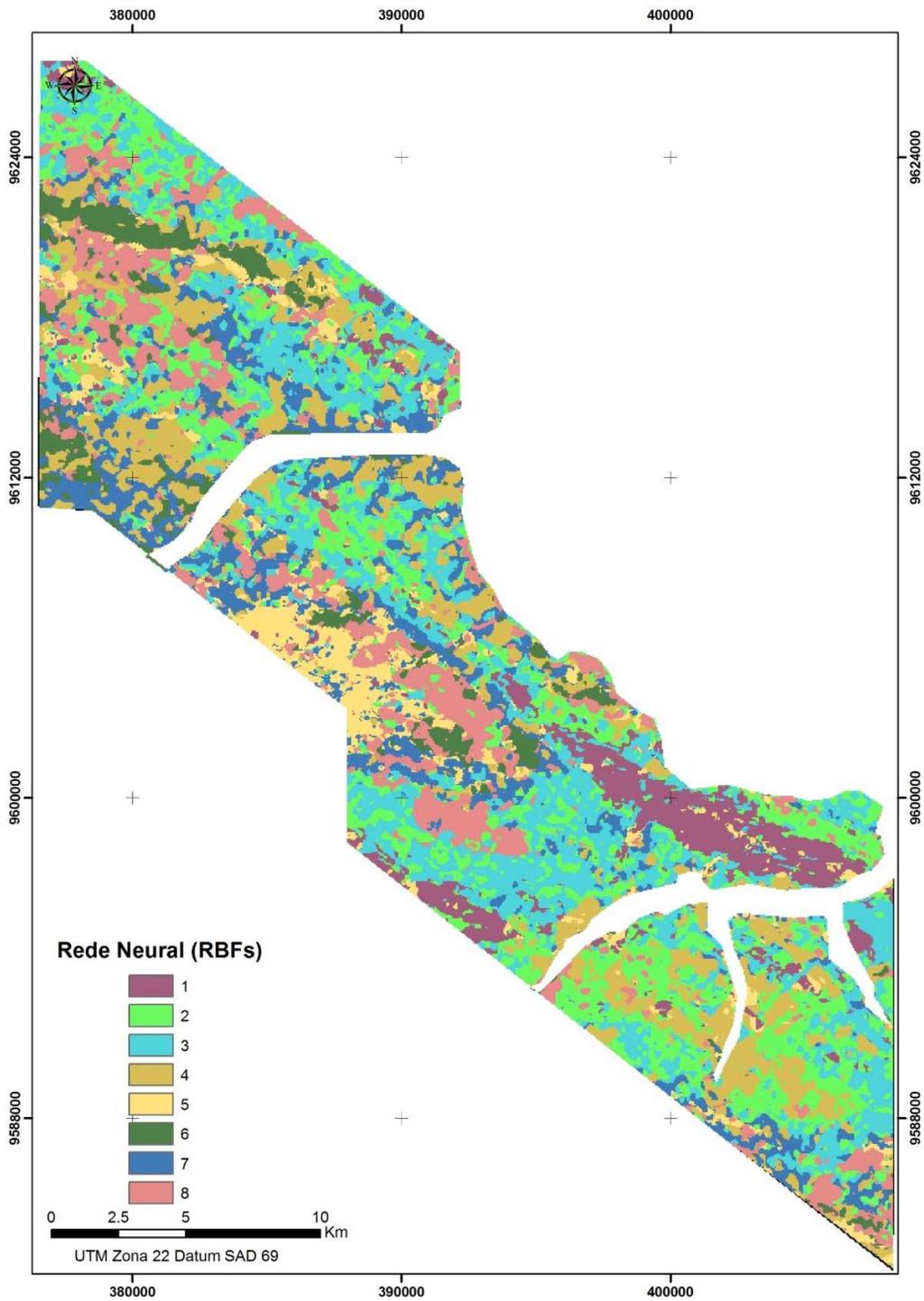


Figura 20 – Petromapa em escala 1:100000, delimitando 8 domínios.

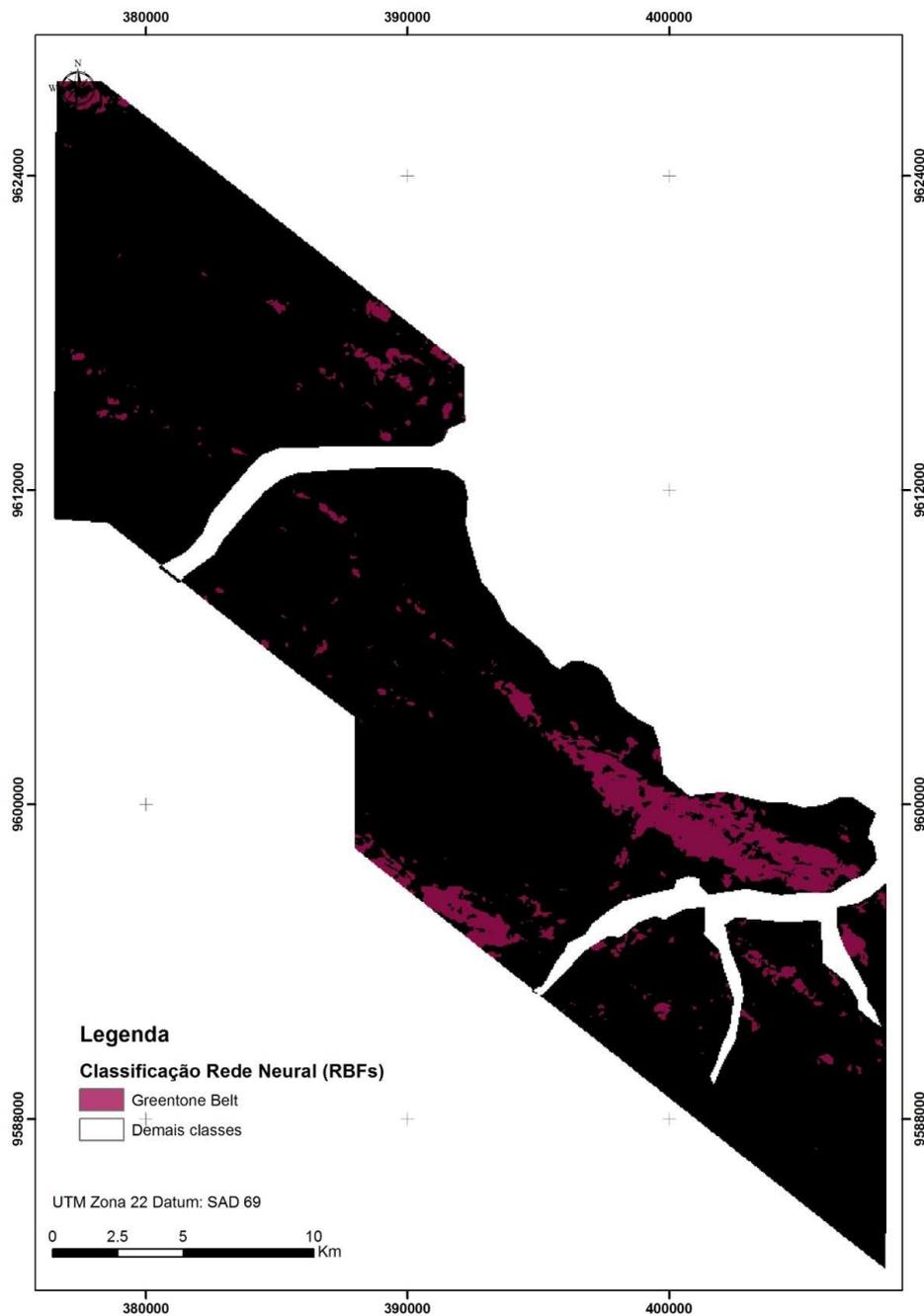


Figura 21- Mapa de assinaturas associadas a rochas do Greenstone Belt Três Palmeiras.

Integração de dados e seu papel no refinamento da cartografia geológica

A partir da análise integrada dos dados geofísicos foi proposto um mapa geofísico-geológico para a área (Figura 22) que possibilitou uma maior definição nos

domínios, resultando na caracterização de subdomínios e refinando a cartografia geológica da região.

A correlação entre os domínios magnéticos e gamaespectrométricos permitiram correlacionar as assinaturas a unidades litológicas mapeadas anteriormente. Apresenta-se a seguir a comparação entre o mapa de Vasquez *et al.*(2008) em escala 1:250. 000 (Figura 23 A) e o mapa geofísico-geológico produzido na escala 1:100.000 (Figura 23 B).

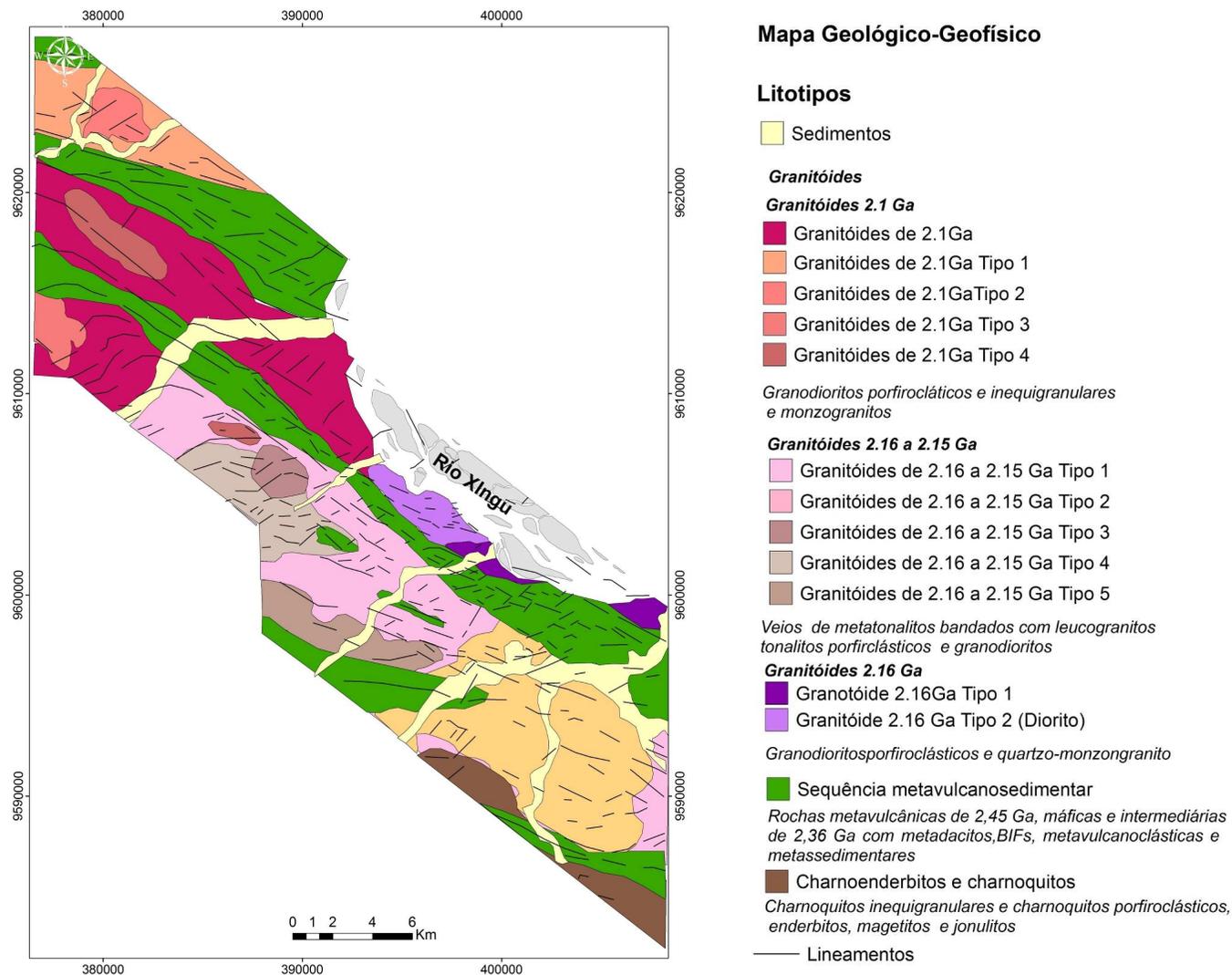


Figura 22- Mapa geofísico-geológico, interpretado em escala 1:100000, através de integração de dados multi-fonte e informações de campo.

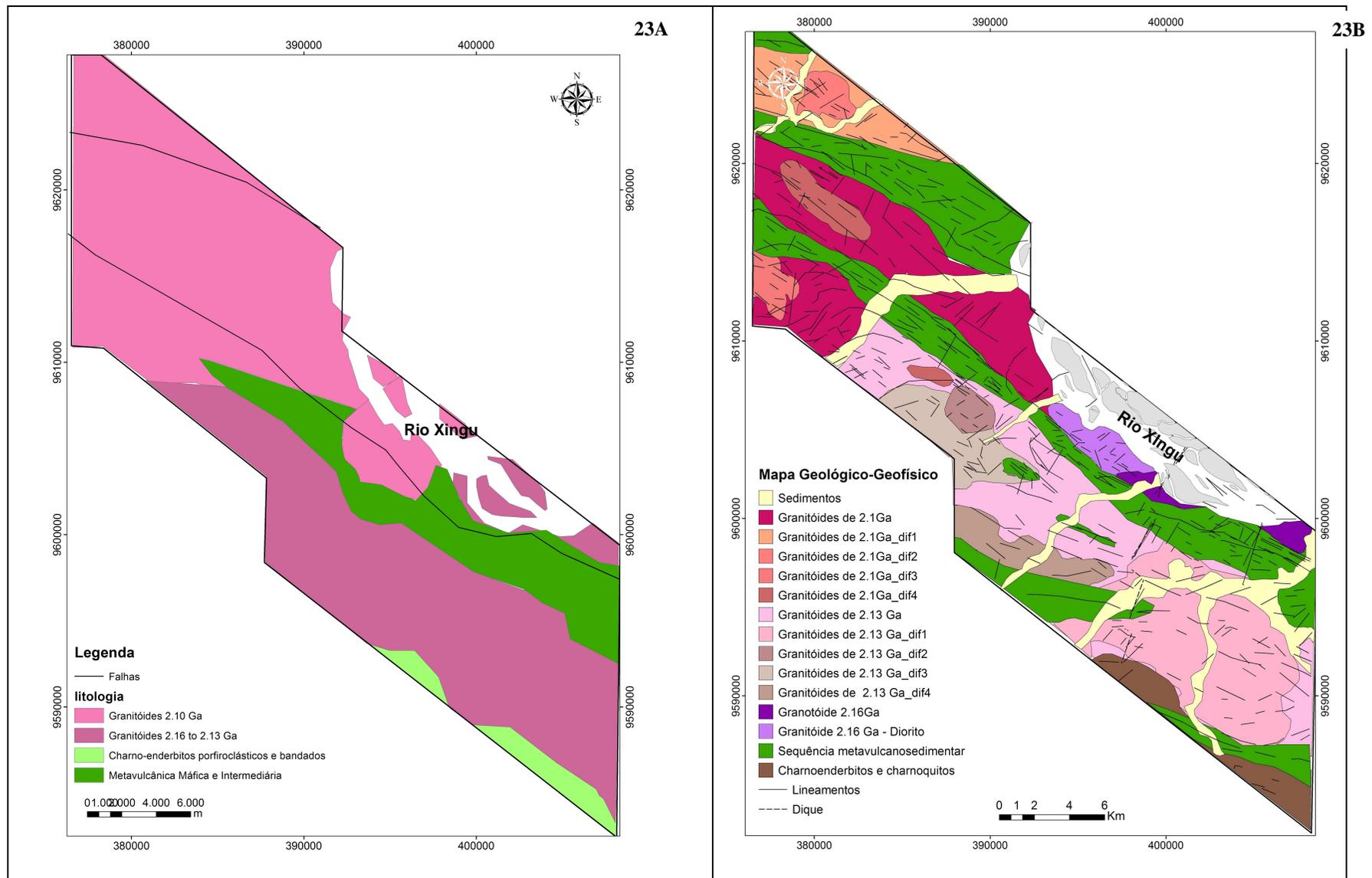


Figura 23A - Mapa geológico proposto por Vasquez (2008) e **23B** - Mapa geofísico-geológico interpretação neste trabalho.

A) Granitóides 2.1 Ga

O domínio apresentado por Vasquez (2008) representa granodioritos e monzogranitos porfiroclásticos. Foi possível distinguir cinco subdomínios para a área. A análise magnetométrica permitiu a caracterização do domínio como de baixa amplitude. Quanto à gamaespectrometria, as variações resultaram na delimitação de cinco subdomínios. A maior porção apresenta altos teores de potássio e teores médios de urânio e tório. A porção no extremo norte da área apresenta um domínio caracterizado por altos teores de potássio e tório, sendo possível distinguir na região central deste subdomínio um novo domínio Caracterizado pela coloração vermelha indicando alta potassificação. Na porção inferior, encontra-se um corpo com altos valores dos três radioelementos.

B) Granitóides 2.13 Ga

O domínio de granitóides de 2,13 Ga é representado por metatonalitos com veios leucograníticos, tonalitos e granodioritos (Vasquez 2008). Possui a maior diferenciação nas características geofísicas. Foi possível dividi-lo em quatro grandes subdomínios e dois subdomínios com menor área de influência. Destaca-se na porção central da área uma porção cuja assinatura magnética é forte e os radioelementos possuem alta distribuição, resultando em uma assinatura de coloração branca. Esta área foi mapeada em campo como rocha granítica. Os grandes domínios seguem a divisão de leste para oeste com composição rica em potássio, urânio e médio de tório e susceptibilidade variando de alta a média, subdomínio de composição rica em potássio e urânio e baixa susceptibilidade magnética e um grande domínio onde predomina o tório.

C) Granotóides 2.16 a 2.13 Ga

O domínio representado por granodioritos e monzogranitos possui uma percentagem baixa na área total, porém sua caracterização é de extrema importância para o entendimento da mineralização aurífera (Vasquez 2008). Destaca-se a diferenciação de um corpo relacionado à mineralização aurífera na área. Trata-se de um diorito, cujas características geofísicas são altos valores dos três radioelementos, localmente com alteração potássica nas bordas e baixa susceptibilidade magnética. As demais regiões delimitadas, como esta associação, possuem alto K e U.

D) Sequência Três Palmeiras

A seqüência do *greenstone belt* é bem evidenciada nos dados magnetométricos, devido à presença de magnetita nas rochas metavulcânicas básicas (Vasquez 2008). A amplitude do sinal analítico, associado à resposta baixa dos radioelementos, mostrou-se um excelente guia para mapeamento desta unidade. As respostas geofísicas são caracterizadas pelos baixos teores dos radioelementos, localmente alterado hidrotermalmente através de uma potassificação, e alta susceptibilidade magnética associada a lineamentos NE-SW. O presente trabalho sugere a ampliação da área desta associação litológica na região superior leste e uma definição no corpo central acompanhando a direção até a borda leste da área. Na área norte ressalta-se também uma alteração provocando um enriquecimento nos três radioelementos.

E) Charnoquitos e charno-enderbitos

Os charno-enderbitos ocorrem em área inferior a 5% do total, não sendo possível uma caracterização geofísica mais efetiva.

Mineralização aurífera e as respostas geofísicas

A mineralização aurífera está associada a do tipo orogenética e a zonas de cisalhamento NW-SE. As ocorrências encontram-se hospedadas em rochas granítica em contato com a porção do *greenstone belt*, sendo localizada em zonas milonitizadas nos granitóides.

Os dados dos gradientes medidos foram efetivos na demarcação de estruturas com assinatura de alto gradiente. Ao compararmos a imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz) com Horizontal Longitudinal dy (GRY) (Figura 23 A e 23 B) nota-se uma melhor definição das estruturas na segunda imagem. Esta imagem associada ao dado gamaespectrométrico auxiliou na delimitação de um novo alvo prospectivo, denominado Alto Alegre.

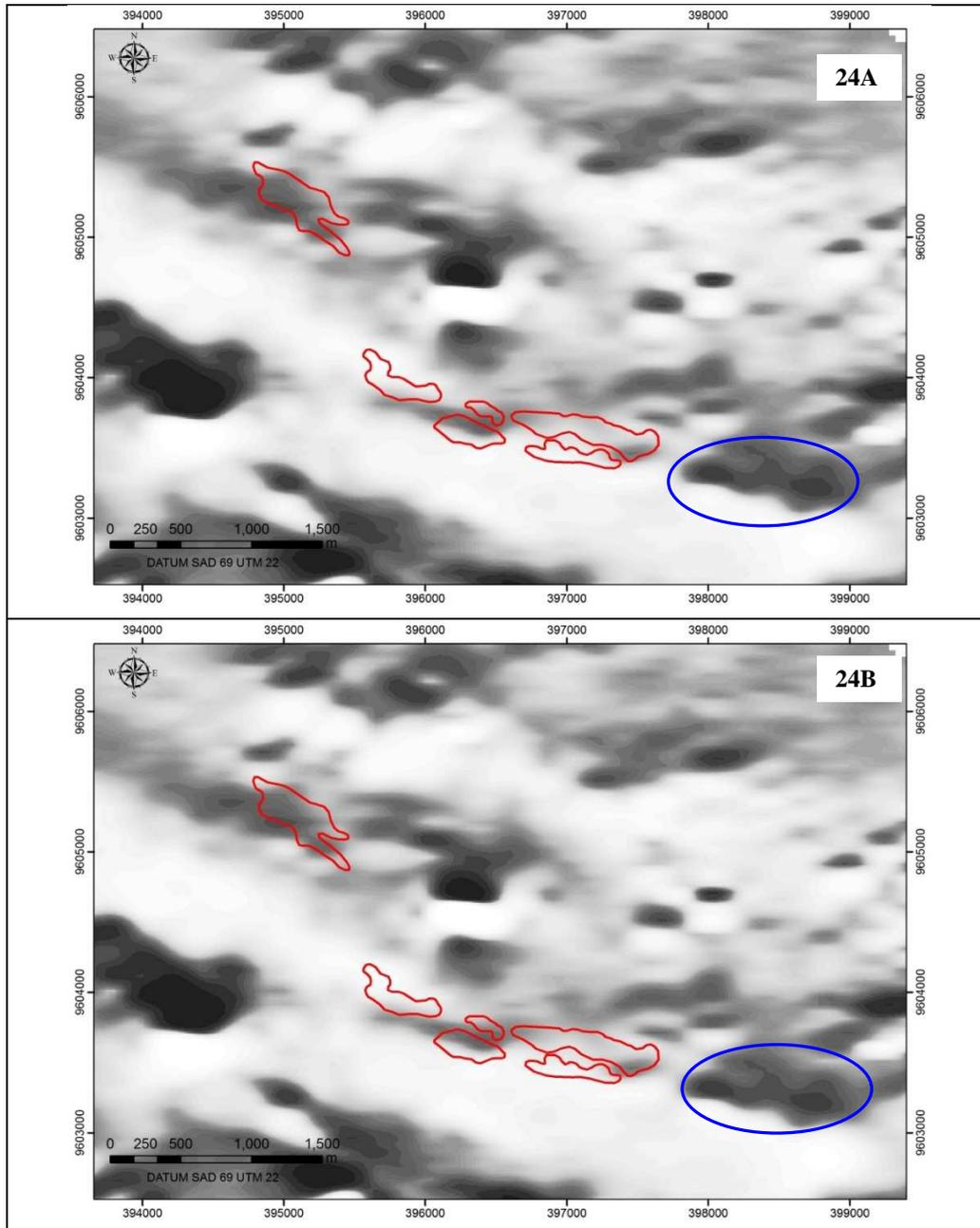


Figura 23 - Região mineralizada representada sobre a imagem da Primeira Derivada Vertical (**23 A**) e o *Gradiente Horizontal Longitudinal* (**23 B**). O corpo assinalado em vermelho representa a localização do alvo Alto Alegre, produto do trabalho, cuja mineralização foi comprovada através de furos de sondagem.

A integração dos dados geológicos e geofísicos foi efetiva na caracterização e delimitação de contatos de corpos granitóides que hospedam as mineralizações

auríferas e rochas do *greenstone belt*. O principal exemplo foi à intrusão situada na porção norte da área, exibindo altos valores dos três radioelementos, localmente porções com enriquecimento de tório e urânio, sendo classificado como diorito a partir de amostras de sondagem. Nota-se que a borda do corpo, associada à mineralização apresenta enriquecimento de potássio. A segunda região mineralizada, associada ao contato estabelecido na porção sul da área não apresentou uma assinatura proeminente nos dados de radar devido à topografia arrasada. Sua assinatura gamaespectrométrica é rica em urânio e potássio. Através de furos de sondagem o corpo foi definido como granodiorito.

CONCLUSÕES

A utilização de dados aerogeofísicos de alta densidade foi efetivo na configuração espacial das unidades litológicas e estruturas tectônicas, permitindo sua aplicação no detalhamento das características litológicas, estruturais e no auxílio a delimitações de novos alvos para a prospecção aurífera. Os três produtos derivados dos dados, confeccionados em escala 1:100000, Mapa de domínios e lineamentos magnéticos, Mapa litogeofísico e Petromapa analisados conjuntamente resultaram no Mapa geológico-geofísico, produzindo uma definição de subdomínios para o mapa geológico proposto por Vasquez (2008).

O mapa de domínios magnéticos delimitou quatro domínios magnéticos diferenciando os contatos entre áreas com assinatura do *greenstone belt* e os corpos adjacentes e lineamentos magnéticos com direção principal NW-SE. O mapa litogeofísico diferenciou 26 domínios de acordo com as assinaturas gamaespectrométricas da área. O petromapa, definido por oito classes, foi definido como uma alternativa na classificação, de forma automática, utilizando os canais gamaespectrométricos e a amplitude do sinal analítico produziu classes confrontantes com as assinaturas geológicas das rochas. O mapa geológico-geofísico final foi composto por 16 classes subdividindo os granitóides classificados por Vasquez (2008). O principal ganho destes produtos pode ser a delimitação de novas áreas com assinaturas semelhantes ao do *greenstone belt*, gerando uma redefinição das bordas dos corpos de rochas máficas e ultramáficas da Sequência Três Palmeiras, incluindo o mapeamento de novas porções a noroeste da área.

Destaca-se ainda a utilização de dados magnetométricos gradiométricos em detrimento aos dados magnéticos levantados com um único magnetômetro. Este tipo de aerolevante magnetométrico apresenta um aumento da acurácia e amplificação de alta frequência, resultando em uma melhor definição do corpo de pequena dimensão. Ao comparar dados gerados pelo gradiente horizontal longitudinal, medido no voo, e pelos dados calculados na derivada vertical verificou-se uma melhor definição espacial das fontes magnéticas. Esse produto mostrou-se eficiente na delimitação de porções desmagnetizadas próximas a zonas cisalhadas, sendo importante no contexto devido à associação da mineralização com estruturas regionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais a empresa Verena Mineração *Ltda.*, nas pessoas de Walid El Koury Daoud, Jad Salomão Neto e Elmer Prata Salomão, pela concessão dos dados aerogeofísicos geológicos, seções e fotos, assim como pelas discussões sobre a geologia da área. Ao LGA-UnB pela infra-estrutura e a UnB pela concessão do mestrado. A segunda autora agradece a bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

REFERÊNCIAS

- AGNERIAN H. 2005 Technical Report on the Volta Grande gold properties- Prepared by Verena Minerals Corporation. Relatório Técnico p.120
- BARROS C. E. C. M., MACAMBIRA M.J.B., SANTOS M.C.C.S., SILVA D.C., PALMEIRA, L.C.M., SOUSA M.M. 2007. Estruturas sinmagmáticas e idade de zircão de granitos (evaporação de Pb) paleoproterozóicos da parte leste do domínio Bacajá, Província Maroni Itcaíunbas. *Rev. Bras. Geoc.*, **37(2)**: 293-304.
- BLUM M.L.B. 1999. Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 229p.
- BRIGGS I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39**: 39-48.
- CARNEIRO C.C., CRÓSTA A.P., SILVA A.M., PINHEIRO R.V.L. 2006. Fusão de Imagens Altimétricas e Aeromagnetométricas como Ferramenta de Interpretação Geológica, Exemplo da Província Mineral de Carajás (PA). *Revista Brasileira de Geofísica*, **24(2)**: 261-271.

- CUNHA E.R.S.P., SANTOS A.R., PARADELLA W.R.; C. E. M. BARROS, VALE A.G., VENEZIANI P. 2006. Integração de Dados de Radar, Aerogamaespectrométricos e Geológicos nos Domínios do Complexa Granítica Estrela, Província Mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geoc.*, **36 (1)** : 327-335
- DAOUD W.K. 2005. Relatórios internos Verena Mineração sobre mineralização aurífera no Volta Grande do Xingu.
- FARACO M.T.L., VALE A.G., SANTOS J.O., LUZARDO R., FERREIRA A., OLIVEIRA M., MARINHO P.A.C. 2005. Levantamento Geológico da Região ao Norte da Província Carajás. *In: Horbe A. M. C. & Souza W. S. (Org.) Contribuições à Geologia da Amazônia*, v. 4, p.: 32-47.
- HOLLIDAY J.R., COOKE D. R. 2007. Advances in Geological Models and Exploration Methods for Copper ± Gold Porphyry Deposits. *Ore Deposits and Exploration Technology*. Paper 53.
- JORGE JOÃO X. da S., VALE A.G., LOBATO T. de A.M. 1987. Altamira: folha SA.22-Y-D, Estado do Pará. Texto explicativo, escala 1:250.000. Brasília: DNPM/CPRM, 1987. 31 p.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. 2007. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Área Volta Grande. Volume I, Texto técnico.
- MACAMBIRA M.J.B., SILVA D.C.C., BARROS C.E.M., SCHELLER T. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a paleoproterozoic terrain in the region at the north of the Carajas Mineral Province. *In: South American Symposium on Isotope Geology (SSAGI)*, v. 4. p. 205-207
- MACAMBIRA M.J.B., BARROS C.E.M., VASQUEZ M.L., SILVA D.C.C. 2004. Investigação do limite Arqueano-Paleoproterozóico ao norte da Província de Carajás, Amazônia Oriental. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, p. 97-99.
- MINTY B.R.S. 1991. Simple Micro-Levelling For Aeromagnetic Data. *Expl. Geoph.* **22**:591-592.
- NÓBREGA R.P., SOUZA FILHO C.R. 2003. Análise espacial guiada pelos dados (data-driven: o uso de redes neurais para a avaliação do potencial poli-minerálico na região centro-leste da Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, **33(2)**: 111-120.
- NÓBREGA R.P. 2001. Análise espacial “knowledge-driven” e “data-driven”: o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na

- região centro-leste da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 72p.
- PARADELLA W.R., SILVA M.M.Q .2005. MAPSAR: Um Radar Orbital para Aplicações na Amazônia. *Infogeo*, Curitiba, v. 7, n. 36, p. 34-36
- PARADELLA W.R, SANTOS A.R., VENEZIANI P., MORAIS M.C. 2000. Synthetic Aperture RADAR for Geological Applications in the Moist Tropics: Experiences from the Brazilian Amazon Region. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:1-10
- PIRES A.C.B., SILVA C.A., MORAES R.A.V., FRANCO H.A., SILVA L.G. 2005. Classificação de corpos intrusivos na região de Coromandel (MG) com apoio de dados magnéticos e gamaespectrométricos: resultados preliminares. *In: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante e II South American Symposium on Diamond Geology*. Diamantina, MG, v. 1. p. 117-120.
- QUADROS T.F.P., KOPPE J.C., STRIEDER A.J., COSTA J.F.C.L. 2003. Gamma-ray data processing and integration for lode-Au deposits exploration. *Natural resources research*, vol. 12, p. 57-65
- REFORD S., 2006. Gradient enhancement of the total magnetic field: The Leading Edge, **25 (1)**: 59-66.
- RICCI P.S.F. et al. 2003. The reanalysed Carajás Block is interposed between the Bacajá (the crustal reworking "lost link" now being predicted) and Rio Maria Archean terranes – Guaporé Craton. *In: Simp. Geol. da Amazônia*, 8. Resumos expandidos. CD ROM
- RICCI P.S.F. 2006. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil - a deep-seated high-T gabbroic pluton (charnockitoidlike) with xenoliths of enderbitic gneisses dated at 3002 Ma – the basement problem revisited. *In: Simp. Geol. da Amazônia*, 9. Resumos expandidos. CD ROM
- SANTOS J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C, Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (eds.) Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, mapas e SIG. CPRM-Serviço Geológico do Brasil*. p.169-226.
- SILVA A. M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195 p.

- SILVA A.M., PIRES A.C.B., MCCAFFERTY A.E., MORAES R.A.V. 2003. Application of airborne geophysical data to mineral exploration studies in the uneven exposed terrains of the Rio das Velhas Greenstone Belt. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 33, 2003.
- SOUSA C.S. de, SILVA R.C.S. 2007. Integração de dados aerogeofísicos (magnetometria) e de sensores remotos para a extração de lineamentos da região ao norte de Carajás, Província Maroni-Itacaiúnas. *In.: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.p.2199-2206.
- TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B.1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22(3)**:174-182
- THOMSON S., FOUNTAIN D., WATTS T. 2007. Airborne Geophysics – Evolution and Revolution. *Exploration . Paper 2. Plenary Session: The Leading Edge.*
- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., GALARZA M. A.2005. Granitóides Transamazônicos da Região Irixi-Xingu, Pará: Novos dados geológicos e geocronológicos. *In: Horbe A.M.C., Silva Souza V. da (Org.). Contribuições à Geologia da Amazônia.* v. 4, p. 16-31.
- VASQUEZ M.L. 2006. Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: Evolução crustal da porção meridional da Província Maroni Itacaiúnas - sudeste do Craton Amazônico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 234p.
- VASQUEZ M.L., ROSA COSTA L.T., SILVA C.M.G, KLEIN E.L.2008. Compartimentação Tectônica (Geologia e recursos Minerais do Estado do Pará). *In: Vasquez, M.L.; Rosa-Costa, L.T. (Org.). Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará.* Belém: CPRM, v., p. 39-112.
- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., ARMSTRONG R.A. 2008. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research* **16**:1279–302
- VERYASKIN A.V. 2001 Magnetic gradiometry: a new method for magnetic gradient measurements. *Sensors & Actuators: A. Physical*, p.233-235.

ANEXO 2

**MODELAGEM ESPACIAL DE DADOS GEOFÍSICOS E SUA INTEGRAÇÃO COM
DADOS GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA REGIÃO DO
GREENSTONE BELT TRÊS PALMEIRAS, PARÁ.**

MODELAGEM ESPACIAL DE DADOS GEOFÍSICOS E SUA INTEGRAÇÃO COM DADOS GEOLÓGICOS PARA PROSPECÇÃO AURÍFERA NA REGIÃO DO *GREENSTONE BELT* TRÊS PALMEIRAS, PARÁ

(Artigo submetido à Revista Brasileira de Geofísica)

Abstract

This paper focus on the mineral favorability mapping using spatial analysis in GIS within Volta Grande do Xingú region. The study area is located in the Três Palmeiras granite-greenstone terrane, Amazon region, which shows potential for gold mineralization. The aim is to select targets with exploration relevance using advanced tools like SAM classification, weights of evidence, neural networks and fuzzy logic. The deposit type and occurrences concerned are orogenic gold deposits and the main evidence data used for modeling were derived from high resolution airborne geophysics.

The key parameters used to describe the orogenic gold mineralization were: i) low magnetic gradients, ii) proximity to granitoids-greenstone belt contacts and iii) anomalous potassium. The artificial neural networks (ANN) model is known as tool that can deal with uncertainty, a great characteristic that provides new possibilities for data exploration. The radial basis functional link nets (RBFLN), a form of ANN, was efficient to generate a propespctivity map with geological background. The result was named Petromap and performed a better result for the total modeled area than fuzzy logic and weights of evidence methods. The weights of evidence predictive model worked well to the North Block, showing the predictive capacity of incorporating and integrating the datasets in order to improve the targeting selection. A conceptual fuzzy logic model was applied to the South Block due the small number of known occurrences. The results of this model were validated with field results and indicated good reability of the models. However, some areas need field tests. The processing and integration of geophysical and geological data resulted in the characterization of the geophysical signature of the mineralized environment. The models were effective in the boundaries of the known mineralized areas and on the appointment of new regions, reducing the exploration areas and assisting in decisions like allocation of new drillholes and geochemistry.

Key words: Spatial analysis, GIS, High resolution airborne geophysics, Granite-greenstone terrane

Resumo

O presente trabalho ilustra o mapeamento de favorabilidade mineral através de análises espaciais realizadas em ambiente SIG na região do Volta Grande do Xingu. A área localiza-se no terreno granito-greenstone Três Palmeiras, na região amazônica, e apresenta potencial para mineralizações auríferas. O objetivo é selecionar alvos relevantes para a exploração usando ferramentas avançadas classificação SAM, Peso de evidência, redes neurais e lógica fuzzy.

Os principais dados evidenciais usados derivaram de aerolevanteamento aerogeofísico de alta resolução. Os parâmetros chave usados para o mapeamento da mineralização aurífera foram: i)baixo gradiente magnético, ii) proximidade do contato granitóides- greenstone belt; iii) anomalia potássica. O modelo de rede neural artificial (RNA) é conhecido como uma ferramenta capaz de adicionar boas características que indicam novas possibilidades de exploração no dado. A função de base radial (RBFLN), uma função de RNA, foi eficiente na geração de um mapa prospectivo com background geológico. O resultado foi nomeado petromapa e forneceu o melhor resultado para a área total do que as técnicas peso de evidência e lógica fuzzy. O modelo executado com peso de evidência indica um bom resultado para o bloco norte, mostrando a capacidade de previsão e integração dos dados melhorando a seleção dos alvos. Um modelo conceitual da lógica fuzzy foi aplicado no bloco sul devido a um número pequeno de ocorrências conhecidas. O resultado deste modelo foi validado em campo e indicou boa compatibilidade com o modelo. Entretanto, algumas áreas necessitam testes de campo. O processamento e integração dos dados geofísicos e geológicos resultaram na caracterização da assinatura geofísica para o ambiente mineralizado. Os modelos foram efetivos na delimitação de áreas já conhecidas como mineralizadas e no mapeamento de novas regiões, reduzindo as áreas de exploração e auxiliando na tomada de decisão para a alocação de novos furos e malhas de geoquímica.

Palavras Chave: Modelagem Espacial, SIG, Aerogeofísica de alta resolução, Terreno Granito-Greenstone Belt.

INTRODUÇÃO

Os modelos de análise espacial desenvolvidos em Sistemas de Informações Georeferenciadas (SIG) visam combinar dados espaciais para descrever e analisar interações, de modo a fazer previsões por meio de modelos prospectivos empíricos, que forneçam apoio para a definição de sítios de maior potencial para a ocorrência de depósitos minerais, ou de outros fenômenos geológicos (Crosta & Souza Filho 2003). Neste contexto, a análise espacial é definida por Bonham-Carter (1994) (in Nóbrega 2001) como um processo gerador de áreas favoráveis a partir de combinação de dados. O principal objetivo da favorabilidade é proporcionar uma análise quantitativa rápida através de processos executados em ambiente GIS, assistindo a tomada de decisão que envolve o gerenciamento estratégico na exploração mineral (Nóbrega & Souza Filho 2003, Nykänen *et a* . 2007a, Nykänen *et a* . 2007b, Magalhães 2008).

A área em estudo recobre parte do Domínio Bacajá, sudoeste do Craton Amazônico. Nesta região afloram diversos granitóides e rochas de sequência *greenstone belt* denominada Três Palmeiras, compreendendo corpos alongados na direção WNW-ESSE (Vasquez 2006). Nesta área são conhecidas mineralizações auríferas associadas a zonas de cisalhamento e interface granito-greenstone.

Visando extrair o máximo de informações derivadas de combinações de diversas fontes, foram testados métodos de modelagem para a área: peso de evidência e lógica fuzzy, além da classificação supervisionada utilizando o algoritmo (SAM).

CONTEXTO GEOLÓGICO E MINERALIZAÇÃO

A área em estudo, denominada Volta Grande do Xingu, localiza-se na porção oeste do Domínio Bacajá, inserido na Província Transamazônica de Santos (2003) ou Província Maroni-Itacaiúnas (Tassinari & Macambira 1999) do Craton Amazônico.

O Domínio Bacajá é composto pelo magmatismo transamazônico com fontes juvenis e de contribuição crustal arqueana (Macambira *et al.* 2004, Vasquez *et al.* 2008a). Seu embasamento é composto por ortognaisses, paragnaisse, ortogranulito e migmatito, cujas rochas ocorrem maciças e com enclave em granitóides (Vasquez *et al.* 2005).

Vasquez *et al.* (2008) agrupa a geologia do domínio em associações litológicas, diferentemente das propostas de Jorge João *et al.* (1987) e Faraco *et al.*(2005), que enfocaram a associação formal litoestratigráfica. Sua classificação estabelece seis associações distintas: ortognaisses, rochas metassedimentares, ortogranulitos, sequências metavulcanosedimentares, granitóides e rochas charnoquíticas (Figura 01).

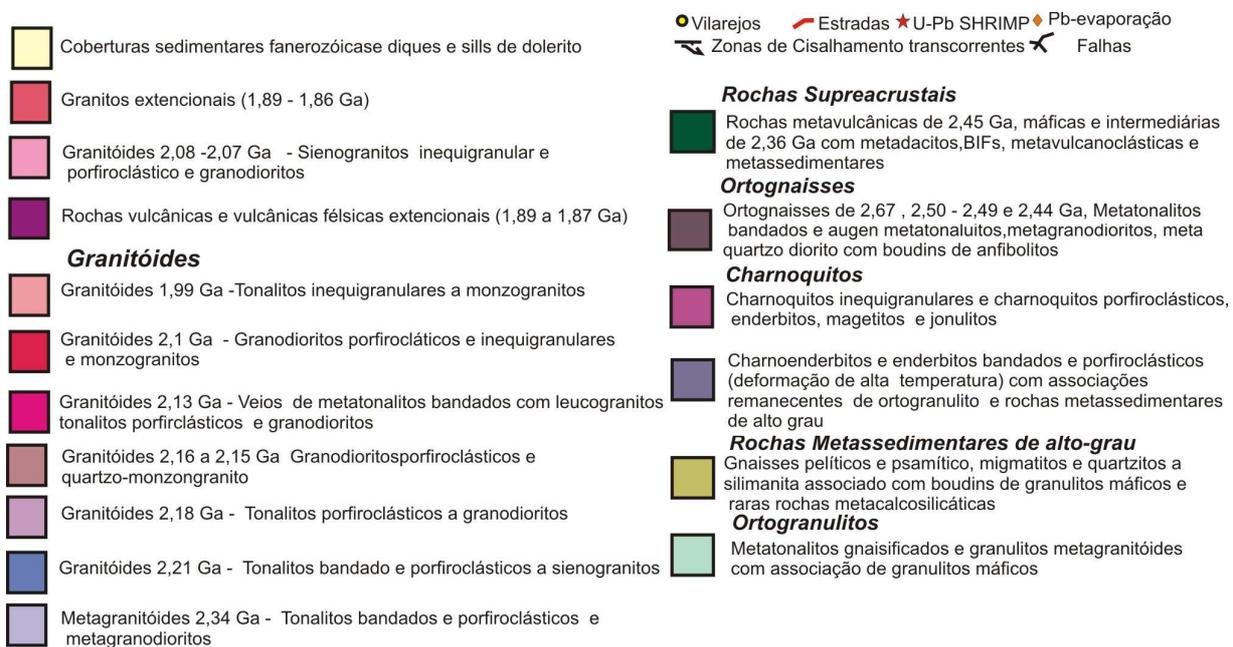
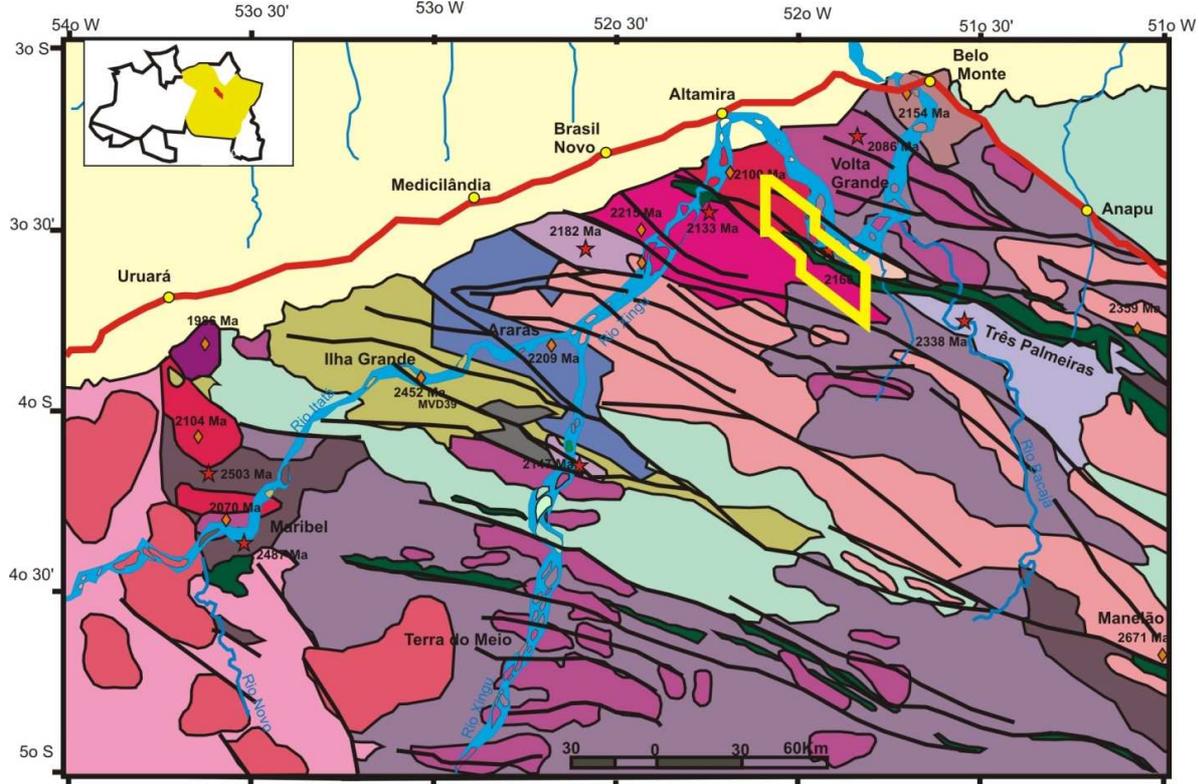


Figura 1 – Mapa geológico da porção leste do Domínio Bacajá (Vasquez *et al.* 2008a). O polígono amarelo representa a área de estudo.

As unidades geológicas estruturam-se segundo NW-SE e WNW-ESSE, caracterizando uma tectônica transcorrente, marcada por extensas zonas de cisalhamento, paralelas e contínuas (Faraco 2005). Barros *et al.* (2007) definiu para a região leste do domínio Bacajá uma foliação penetrativa com direção entre N60°W a WNW-ESSE com mergulhos altos.

Modelo da mineralização

A mineralização aurífera assemelha-se ao tipo orogenética associada à *greenstone belt*, seguindo modelo apresentado por Groves *et al.* (2003). Ela é caracterizada por vênulas e veios de quartzo com ouro. O presente depósito foi apresentado por Daoud (2005) como composto por corpos tabulares mineralizados confinados entre o contato de granitóides e rochas do *greenstone belt*. São corpos alongados na direção NWN-ESSE, atingindo até 300m de largura e zonas silicificadas mineralizadas com espessura entre 2m e 10m, com mergulho geralmente subverticais (Figura 02). Um detalhamento do corpo Grota Seca foi exemplificado na Figura 03.

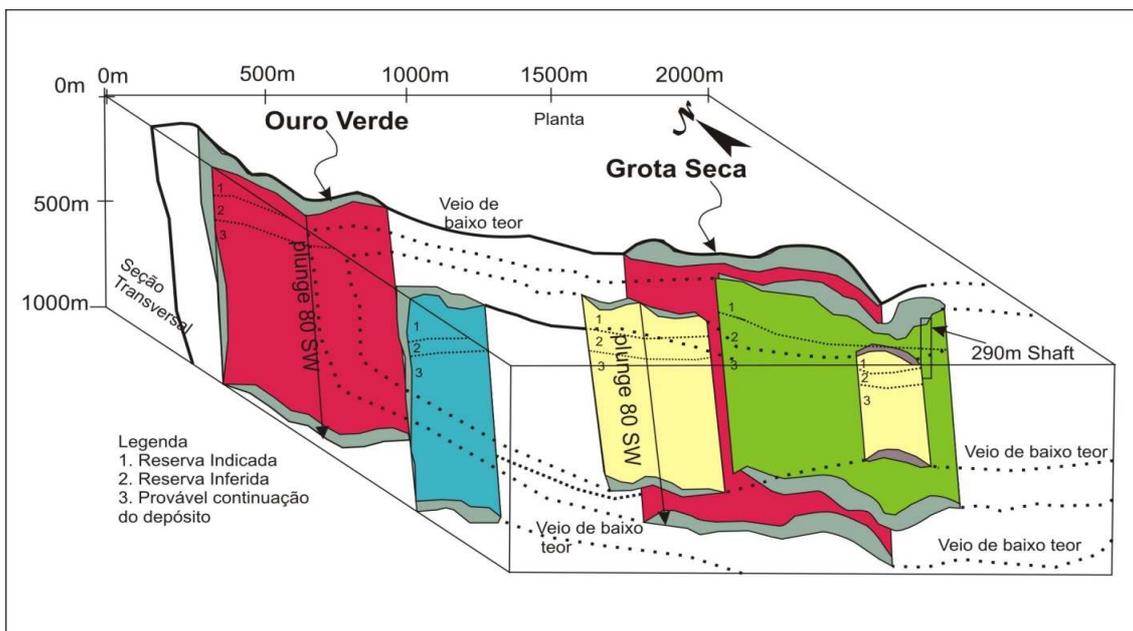


Figura 2- Bloco diagrama dos corpos mineralizados da área representando os blocos tabulares seguindo o trend regional (Fonte: Verena Mineração Ltda.).

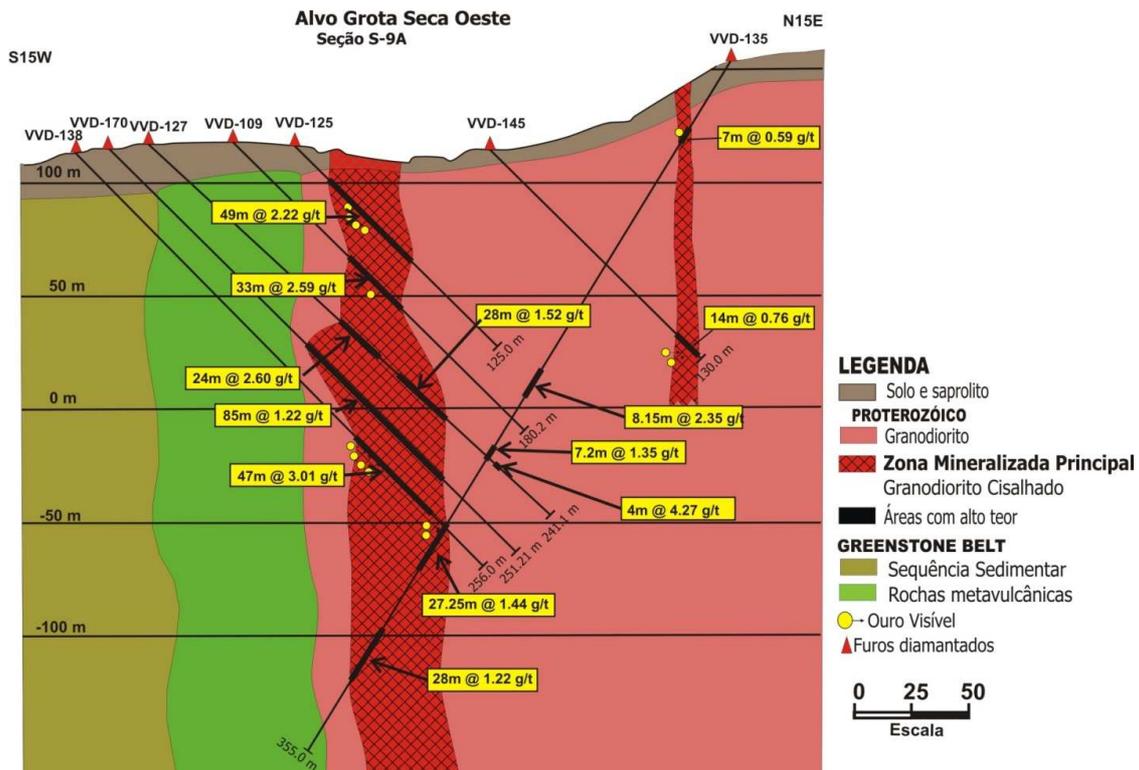


Figura 3 – Seção transversal exemplificando o modelo para a mineralização na área do projeto Volta Grande. O ouro, muitas vezes visível, concentra-se em regiões próximas ao contato das supracrustais do *greenstone belt* com granodiorito e são marcadas por zonas cisalhadas e silicificadas (Fonte: Verena Mineração Ltda.).

A mineralização é controlada por estruturação regional com regiões cisalhadas e repletas de vênulas e veios de quartzo. Em furo de sondagem é possível distinguir regiões milonitizadas, muitas vezes associadas a vênulas e a ouro visível. A mineralização encontra-se associada às alterações hidrotermais de sulfetação e silicificação (Figura 4). As demais alterações relatadas são cloritização, carbonatação e potassificação, hidrotermal foram registradas na área: silicificação, sulfetação, sendo a mineralização associada às duas primeiras. Os maiores teores ocorrem nas zonas silicificadas e associadas a milonitos sobre a forma de vênulas (Figura 5).



Figura 4 – Veio de quartzo em diorito. Nota-se alterações hidrotermais potássicas, silificação e sulfetação, evidenciadas pela presença de feldspato potássico, quartzo e pirita respectivamente.

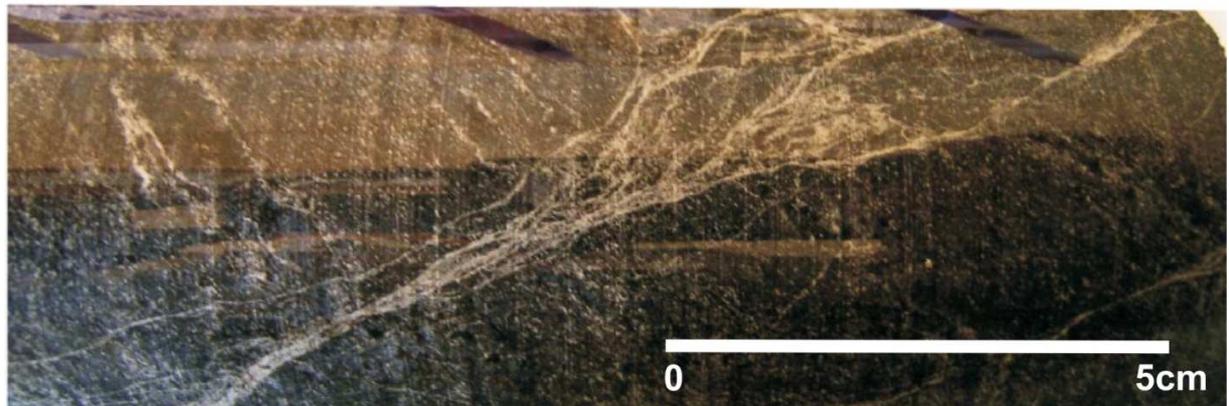


Figura 5 – Milonito cortado por vênulas discordantes, associado a ouro invisível.

As investidas exploratórias realizadas na área culminaram na delimitação de dois blocos associados a granitóides intrudidos na sequência *greenstone* (Figura 6). O primeiro localizado a norte é de composição diorítica e foi dividido em dois corpos de minério denominados Grotta Seca e Ouro Verde. A sul, no domínio do Granodiorito Itatá, encontra-se uma zona de cisalhamento, contendo mineralização. A mineralização do bloco norte associa-se a pirita enquanto a mineralização do bloco sul agrega entre os minerais de minério arsenopirita.

A carta metalogenética divulgada pela CPRM cita ambiente favorável para ouro, estanho e tungstênio. Faraco *et al.* (2005) reporta mineralizações de ouro e sheelita associados a xistos máficos e anfibolitos. João Jorge *et al.* (1987) por sua vez destaca a presença de cassiterita aluvionar em rios que drenam o Anfibolito Itatá.

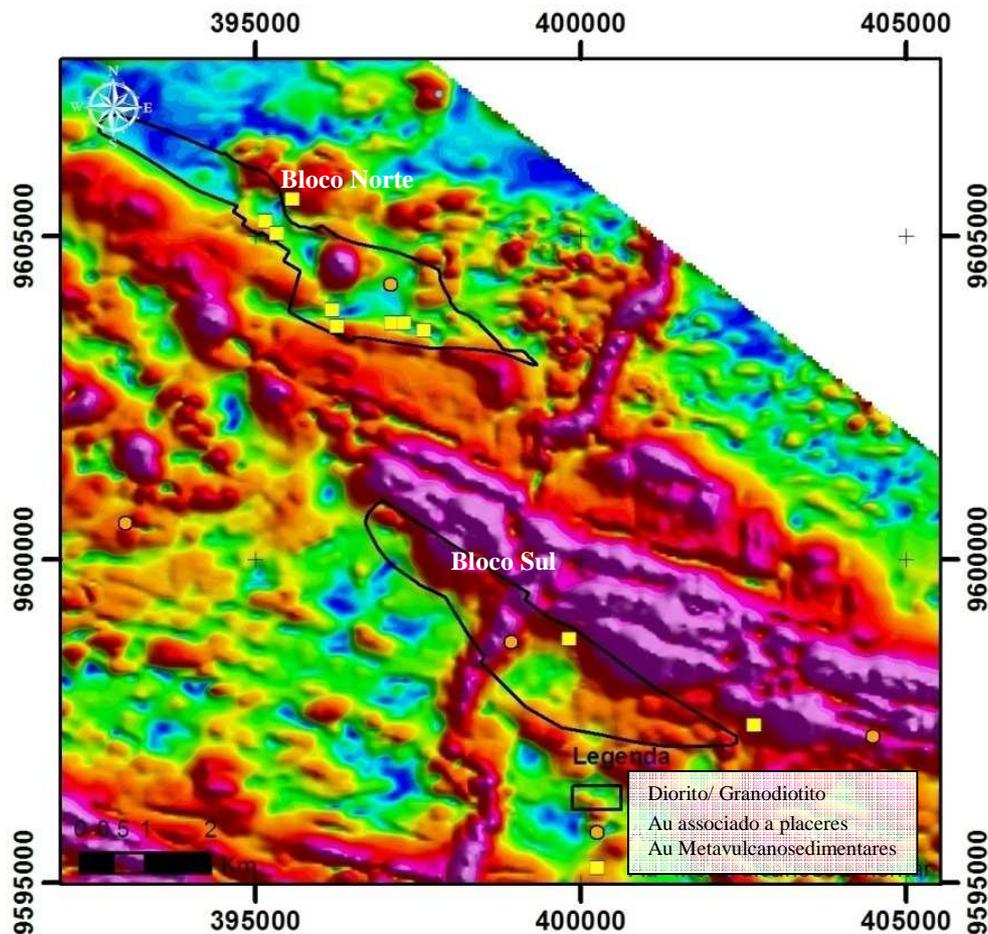


Figura 6 – Localização dos granitóides hospedeiros da mineralização. A mineralização está associada ao contato granito-*greenstone belt*. Estudos anteriores definiram dois blocos com mineralização aurífera: Bloco Sul e Bloco Norte.

MATERIAIS

Os dados utilizados neste estudo foram aerogeofísica de alta resolução (magnetometria gradiométrica e gamaespectrometria) e dados de geoquímica para ouro. Os lineamentos, importantes na estruturação da mineralização, assim como os contatos geológicos foram interpretados a partir da integração entre mapas geofísicos e de sensores remotos (Radar SAR). Foram empregados 15 pontos de treinamento na técnica peso de evidência (WofE) e dois sítios referenciados para a classificação *Spectral Angle Mapper* (SAM). Estes pontos representam pontos de mineralização (indicação ou depósito) documentados pelo CPRM (Vasquez *et al.* 2008a), dados positivos de sondagens e malhas de solo, fornecidas pela empresa Verena.

Para a modelagem foi utilizado os software arcGIS 9.3 da ESRI, com a extensão arcSDM. A extensão é de domínio publico e encontra-se publicada para download em http://www.ige.unicamp.br/sdm/default_e.htm. As classificações SAM foram realizadas utilizando o software ENVI 4.3.

GEOFISICA

Os dados de alta resolução aerogeofísico compreendem a área de aproximadamente 555 Km² e 3.087 km lineares. As linhas de voo foram realizadas na direção N-S, com espaçamento de 200 m e as linhas de controle perpendiculares com espaçamento de 2000 m. A medida de intensidade magnética e canais radiométricos foram realizados com sobrevôo a 100 m de altitude. O aerolevantamento contou com o levantamento gradiométrico para os dados magnéticos, composto por três magnetômetros.

Os dados geofísicos foram previamente processados e realçando, culminando na geração de produtos derivados para aplicação. Destaca-se o uso de magnetometria gradiométrica como uma poderosa ferramenta para aplicações onde as características do campo magnético produzido pelas fontes de anomalias são importantes. Foram utilizados os produtos magnetométricos: amplitude do sinal analítico (ASA), gradiente horizontal lateral (GRX) e gradiente horizontal longitudinal (GRY). Os canais individuais (K, eTh e eU) e suas razões (U/K, Th/K e U/Th), além da composição ternária RGB (K, eTh e eU) compuseram os dados gamaespectrométricos. A interpretação das estruturas magnéticas complementa a base.

PONTOS DE TREINAMENTO

Para a análise guiada pelos dados faz-se necessária a utilização de pontos mineralizados conhecidos. Para este trabalho foram selecionadas 18 ocorrências, das quais 13 representam pontos de sondagem contendo intervalos maiores que 1m@0.7g/t. Pontos de geoquímica de solo com valores duas vezes maiores que o desvio padrão também foram utilizados para a delimitação das áreas. Essencialmente estes pontos pertencem ao bloco norte. Apenas dois pontos mineralizados no bloco sul foram disponibilizados, sendo os mesmos utilizados para checagem visual do resultado

no modelo fuzzy aplicado. Para a classificação SAM foi escolhida uma coordenada com valor anômalo de ouro, representando um pixel no bloco norte e um no bloco sul.

MÉTODOS

A metodologia utilizada para mapas prospectivos segue o ilustrado na Figura 7, sendo segmentada nas seguintes etapas: i) O modelo prospectivo é definido por grupo de especialistas usando conhecimento em modelo de depósitos. ii) É feita uma seleção criteriosa de dados que comporão a base. iii) O processamento e ajustes utilizando ambiente GIS e software de processamento. iv) A definição da técnica de modelagem espacial. No presente trabalho apresentamos três diferentes técnicas: peso de evidência, fuzzy e redes neurais. v) Validação através de estatística e visual.



Figura 7 – Fluxo de dados para confecção de mapa de favorabilidade

CLASSIFICAÇÃO SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)

A classificação supervisionada proporcionada pelo algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al.* 1993) baseia-se na comparação entre a assinatura dos *pixels* de composição desconhecida que integram a imagem, e a assinatura dos *pixels* de referência, previamente determinados como alvos ou *assinatura de referências*, associados às ocorrências de ouro já conhecidas da área. O espectro é calculado pelo ângulo entre os dois espectros em espaço *n*-dimensional (Kruse *et al.* 1993). Pequeno ângulo entre os dois espectros indica alta similaridade e alto ângulo baixa similaridade (Figura 8).

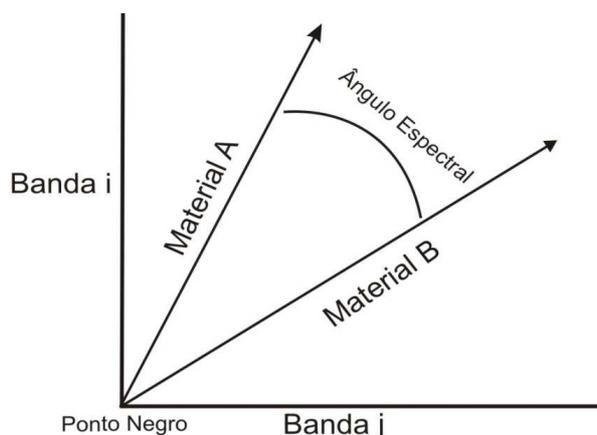


Figura 8 – Ângulo espectral entre material A e B em dois canais (Kruse *et al.* 1993)

Esta técnica originalmente concebida para classificação espectral de imagens hiperespectrais de sensoriamento remoto, foi aplicada em dados aerogeofísicos. Recentemente a técnica foi utilizada em áreas intemperizadas e mineralizadas (Carrino *et al.* 2008, Miethke *et al.* 2007).

Foi aplicado para a imagem composta por quatro bandas, os três canais K, Th e U e o dado magnetométrico amplitude do sinal analítico, todos convertidos em 8 bits. O ângulo de similaridade escolhido foi de 0,10 radianos. Os píxeis compostos de ângulos pequenos, associados à maior similaridade entre os *pixels* de referência e os demais se encontram representados pela cor vermelha. A técnica foi aplicada com base nos assinatura de referência mineralizado dos blocos norte e sul, sobre as coordenadas 396304/9603662 e 400548/9598304 respectivamente.

Ambos os blocos foram satisfatoriamente mapeados. É importante notar na Figura 09, a continuidade da zona mineralizada no bloco norte indicando os corpos já conhecidos. A mineralização esta condicionada a zonas alteradas no contato diorito-*greenstone belt* bem evidenciada na resposta da SAM. Alguns pontos cuja resposta é similar a estes píxeis encontram-se sobre as ilhas próximas ao corpo, devendo ser descartadas. Destacam-se também porções ao longo da zona de alteração NW-SE e maior concentração na borda do corpo a sudeste da área, descrito em literatura como granito. Este granito esta possui como assinatura alta amplitude no sinal analítico, sendo este contato granito-*greenstone* de interesse para a exploração mineral na região. As regiões delimitadas com polígonos de contorno preto foram considerados

como falso resultado. Trata-se da resposta de sedimentos associados a um braço de drenagem e a uma ilha do Rio Xingu.

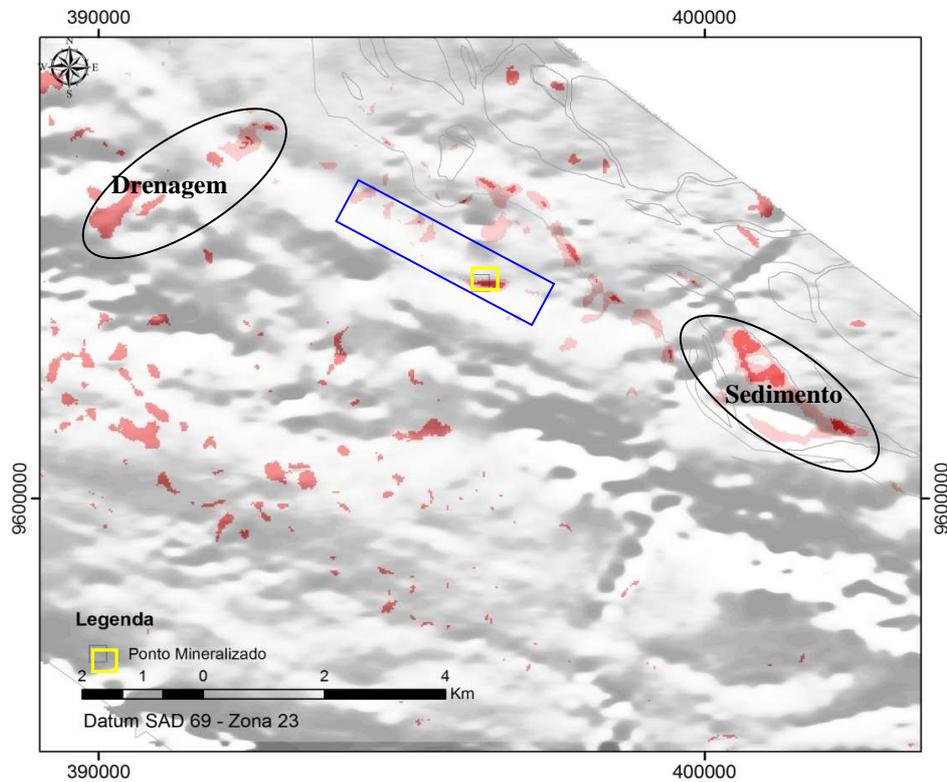


Figura 9 – Resposta da classificação SAM baseado no assinatura de referência localizado no corpo Ouro Verde (em destaque na coloração amarela). Nota-se uma definição de corpos na borda do lineamento representado pelos pontos vermelhos posicionados dentro do polígono azul.

A mineralização do bloco sul é associada principalmente a transcorrência NW-SE, não tendo o corpo hospedeiro assinatura gamaespectrométrica tão característica quanto o bloco norte. A aplicação da técnica SAM delimitou dois corpos no contato granodiorito–greenstone belt em toda a extensão da zona de cisalhamento, entre eles o corpo delimitado pela empresa Verena para a região, representado pelo polígono azul na figura 10. As regiões delimitadas por polígonos pretos representam sedimentos localizados no Rio Itatá, sendo descartados da área a ser pesquisada.

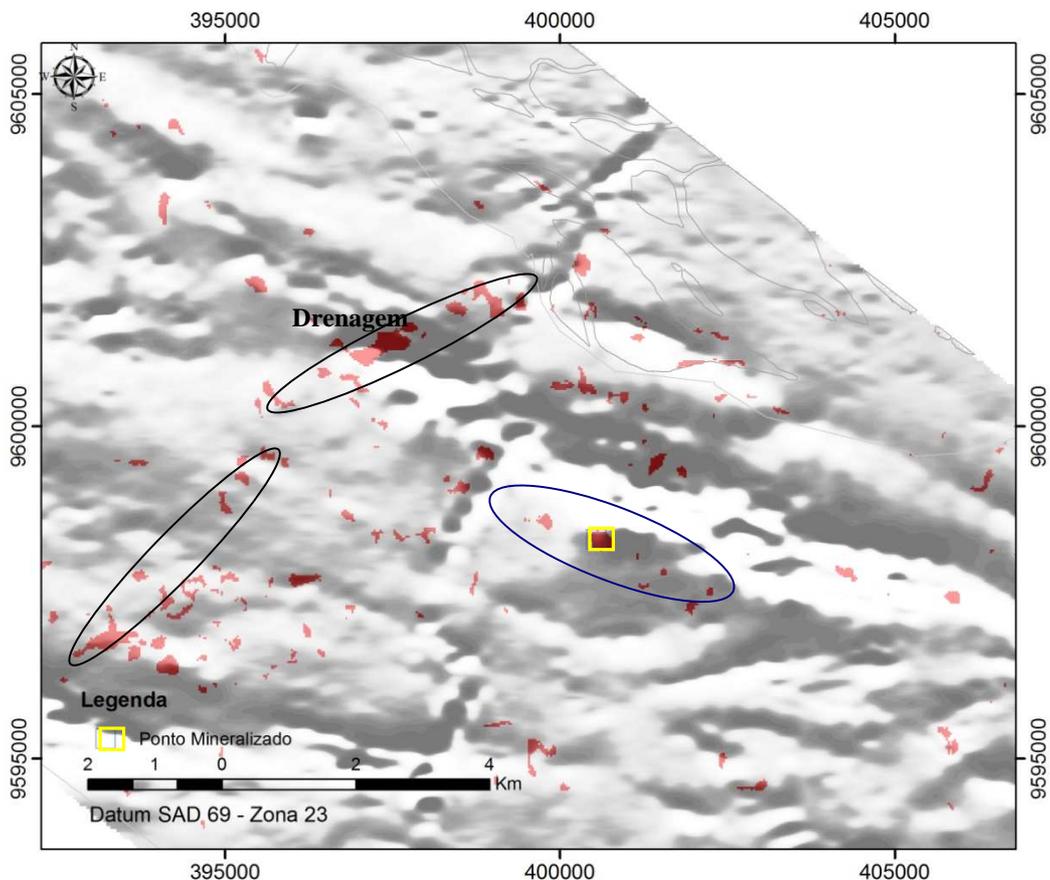


Figura 10 – Resposta da classificação SAM para o corpo Pequí, em destaque no polígono amarelo. Nota-se que demais corpos ao longo do trend foram realçados como resposta espectral idêntica ao ponto assinatura de referência. Estes pontos a NW e SE do corpo resultaram em novos alvos exploratórios, com sucesso em furos de sondagem e malhas de geoquímica de solo.

TÉCNICAS DE MODELAGEM

Bonham-Carter (1994) define modelos de favorabilidade em duas classes: dirigido pelos dados (*data-driven*) e dirigido pelo conhecimento (*knowledge-driven*) (Nykänen *et al.* 2006, Nykänen *et al.* 2007 b). Os dados dirigidos pelo conhecimento são conhecidos como dados empíricos, onde pontos de treinamento são usados para correlação espacial entre as ocorrências conhecidas e feições particulares tais como dados geológicos, geofísicos e geoquímicos. As relações identificadas são quantificadas e integradas em um mapa prospectivo único. No modelo *data-driven* os

vários mapas de entrada são combinados por diferentes técnicas, tais como regressão logística, ponderação por evidências (teorema bayesiano), razões de probabilidade e redes neurais (inteligência artificial).

Os modelos *knowledge-driven* são dirigidos por especialistas através de critérios mapeáveis (ex. estruturas favoráveis, valores anômalos para geofísica e geoquímica). A integração entre estes critérios revela áreas mais favoráveis para determinado objetivo. Suas técnicas incluem o uso da lógica booleana (ou lógica *crisp*), média ponderada, lógica difusa (nebulosa) ou pertinência *fuzzy* (Nykänen *et al.* 2007 b).

Redes Neurais - RNN

As redes neurais artificiais são modelos computacionais distribuídos, paralelos, adaptativos e inspirados no raciocínio humano (Brown *et al.* 2000, Nóbrega 2003). A composição das redes é baseada em conceito de neurônios, que são elementos computacionais associados a pesos para cada conexão. Desta forma, este mapa será o resultado da combinação de camadas de entrada (mapas evidenciais), uma camada de saída (resultado), e uma ou duas camadas ocultas, contendo a função que irá determinar os coeficientes numéricos a serem associados aos neurônios, permitindo a sua classificação (Figura 11). Esta aplicação da técnica é especialmente interessante devido à habilidade em extrair padrões ocultos em conjuntos de dados que podem ser imperceptíveis aos humanos e as técnicas estatísticas tradicionais; sem a necessidade de conhecimento prévio de características específicas do dado (Brown *et al.*, 2000, Nóbrega & Souza Filho, 2003, Magalhães 2008).

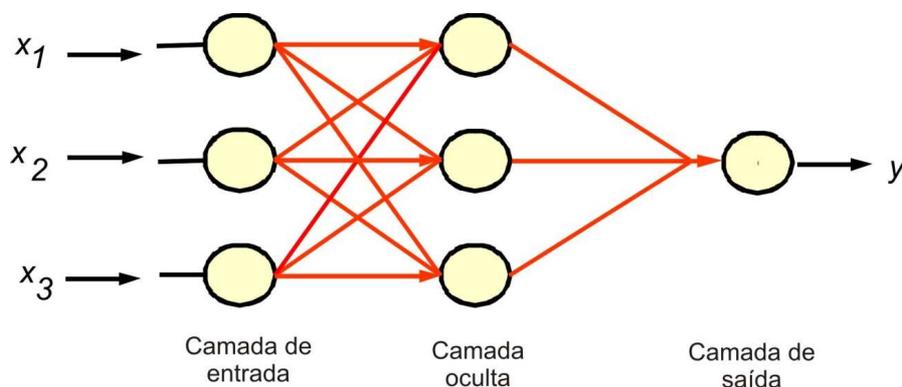


Figura 11- Arquitetura da rede neural artificial do sistema *Probabilistic Neural Networks* (PNN)

Efetuuou-se uma análise integrada em ambiente SIG utilizando o módulo de redes neurais dentro do algoritmo *Spatial Data Modeler* (SDM), gerando um mapa litogeofísico de forma automática, aqui denominado de Petromapa. Esta classificação consistiu na integração entre as características rasas adquiridas pela gamaespectrometria, adquiridas dos canais K, Th e U e dados de natureza profunda, obtidos da amplitude do sinal analítico. Optou-se por utilizar o algoritmo RBFLN (*Radial Basis Functions*; Looney & Yu 2000) e o *software Geoexplorer* para o treinamento da rede. Maiores detalhes podem ser conferidos em Ruy *et al.*2009. Utilizou-se essa classificação com intuito de caracterizar as assinaturas para o ambiente mineralizado. Os corpos mineralizados do bloco Norte foram individualizados na figura 12.

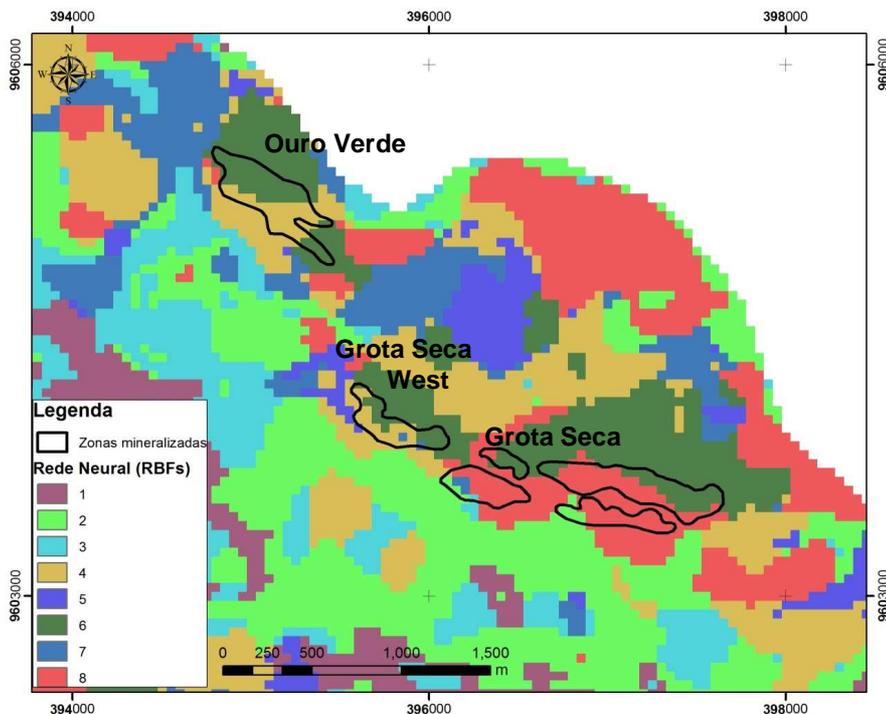


Figura 12 - Assinatura do Bloco Norte, identificando como características três assinaturas para a mineralização, distintas entre o corpo Grota Seca e Ouro Verde. Nota-se os pixels quadrados devido a uso de células de 50m para a análise.

Nota-se que os corpos estão localizados em contatos entre as classes 4 e 8 e regiões onde a classe 6 e a 8 são as responsáveis pelo contato. A classe 8 categoriza áreas com baixa amplitude magnética e altos valores dos radioelementos K, eTh e eU,

por vezes mostrando alteração potássica e de tório. O corpo Grotta Seca, mais representativo na área é classificado nesta categoria. Já a classe 4 representa áreas média amplitude e enriquecimento de urânio, sendo representada pela coloração ciano. Nesta segunda classe posicionam-se os corpos *Ouro Verde* e o *Grotta Seca West*. Ambas as classes apresentam contato com regiões de alta amplitude magnética e baixo dos três radioelementos e com a definição de um domínio com altos valores de radioelementos e porções de alta amplitude.

Peso de evidência - WofE

Este modelo combina uma coleção de dados, organizados em forma de mapas, utilizando estrutura de probabilidades, segundo regra de Bayes (Bonham-Carter *et al.* 1988, Bonham-Carter 1994, Nykänen *et al.* 2007 a). Baseia-se na existência de células com mesma evidência, sendo dirigido pelo dado e evitando a escolha subjetiva de pesos e evidências favoráveis. Através da quantificação do grau de sobreposição entre os sites de treinamento e o padrão do dado de evidência pode ser calculado um par de pesos (W^+ e W^-) para cada classe de mapa temático. Valores positivos em W^+ indicam associação positiva entre os pontos de treinamento e os mapas de evidência e W^- indicam associação negativa respectivamente. O cálculo do contraste ($C = W^+ - W^-$) mede a associação entre os sites de treinamento e os mapas de evidência. O contraste normalizado $C/s(C)$, denominado confiança, indica o grau de incerteza entre os pesos calculados. Este valor deve ser superior a 97,5% e deve ser maior que 1,96 para ser aceitável. É calculada a probabilidade a posteriori, que é o produto da probabilidade a priori por um fator que depende da frequência com que os pontos de treinamento ocorrem no mapa de evidência.

Optou-se pela escolha de subárea contendo o Bloco Norte para a aplicação desta técnica devido à existência de um conjunto de pontos de treinamento. Dada a concentração destes pontos foi efetuada uma reclassificação e escolha de pontos representativos, resultando na tabela de pontos de evidências exemplificados na tabela abaixo.

Tabela 1- Pontos de treinamento para o Bloco Norte.

No.	Evidência	Alvo
1	Furo positivo	Grota Seca
2	Furo positivo	Grota Seca West
3	Furo positivo	Serrinha
4	Furo positivo	Grota Seca
5	Furo positivo	Grota Seca
6	Furo positivo	Grota Seca
7	Furo positivo	Grota Seca
8	Furo positivo	Alto Alegre
9	Furo positivo	Gameleira
10	Furo positivo	Greia
11	Geoquímica de Solo	Gameleira
12	Geoquímica de Solo	Gameleira
13	Geoquímica de Solo	Gameleira
14	Geoquímica de Solo	Gameleira
15	Geoquímica de Solo	Gameleira

Para o modelo optou-se pela utilização dos mapas originais dos três radioelementos K, Th e U, combinados com amplitude do sinal analítico. Todos foram reclassificados em binários e feito o calculo do peso de evidência. A Figura 13 retrata os mapas utilizados com evidenciais. Apenas as áreas consideradas como favoráveis para o modelo estão representadas em roxo.

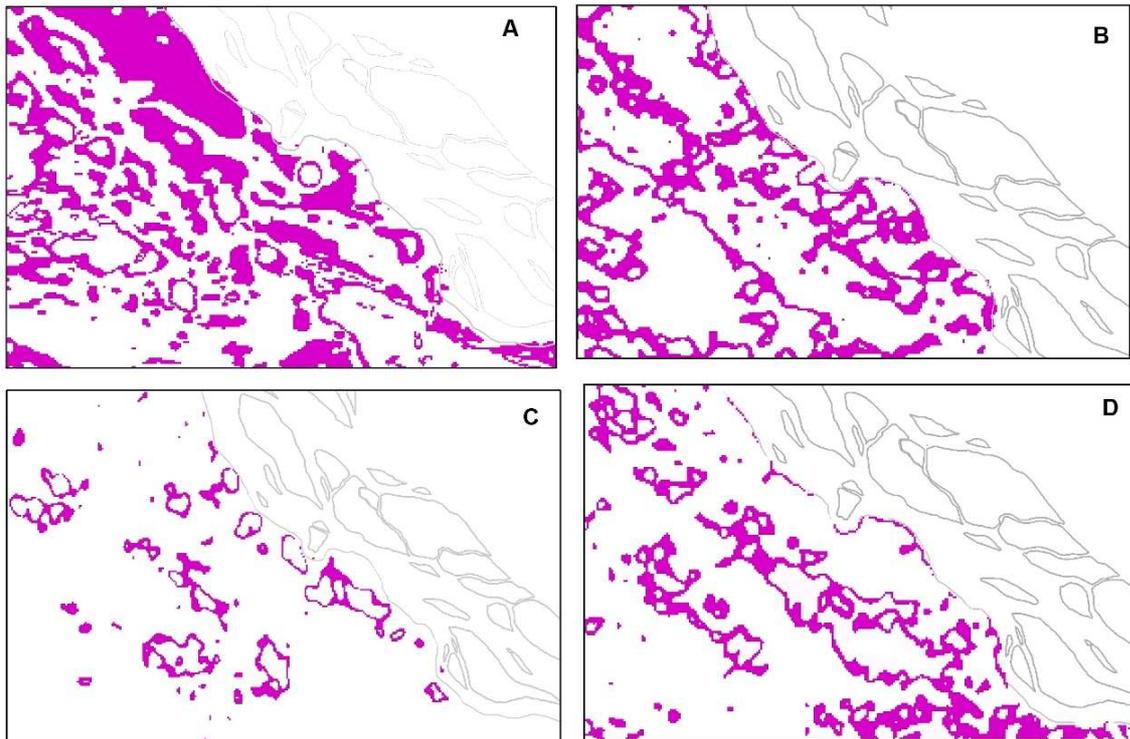


Figura 13 - Mapas binário da amplitude do sinal analítico (a), potássio (b), tório, Th (c), urânio, U (d). Área em roxo, *inside* e área em branco, *outside*.

Os padrões de independência foram testados segundo a técnica adotada por Agterberg & Cheng (2002). O método consiste em testar o número total de ocorrências no modelo através da determinação através da somatória do produto da área de unidade de célula no modelo de probabilidade posterior para todas as células do modelo (Bonham-Carter 1994, Nykänen *et al.* 2006). Os parâmetros de entrada na modelagem foram: i) probabilidade a priori: 0.015632, ii) pontos de treinamento: 15 e iii) unidade de área: 0,5 Km². O resultado para o modelo adotado pode ser conferido na tabela 2.

Tabela 2 - Teste de condição de independência para o modelo gerado. Dados nos métodos Conditional Independence Ratio (CIR) e Agterberg & Cheng Conditional Independence Test (A&C CIT).

Variáveis	CIR	A&C CIT
ASA, K, Th e U	0.818782	79.4%

Ao confrontar o resultado da modelagem com os dados de furos mineralizados, nota-se uma sobreposição entre cinco furos mineralizados utilizados como pontos de treinamentos e áreas evidenciadas pelo modelo como detentoras do maior potencial. Os demais pontos plotados sobre a cor rosa estão localizados em porções de potencial mediano (Figura 14).

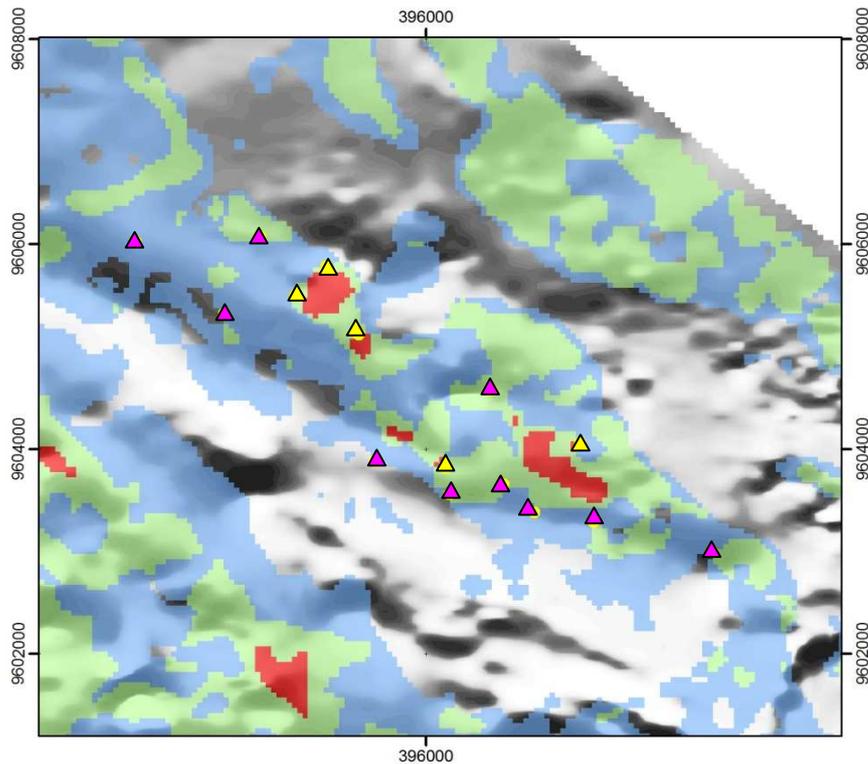


Figura 14 – Modelo WofE para o bloco norte. A probabilidade está distribuída em escala de cores frias para quentes. Pontos representados em cor amarela representam os pontos de treinamento, mineralizados, com máxima correlação com o modelo. Os demais plotados em rosa apresentam localização sobre áreas com uma potencialidade mediana.

Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy é um método dirigido pelo conhecimento, onde o especialista se baseia nas condições geológicas e ocorrências minerais não sendo exigidos pontos de treinamento. A teoria da lógica fuzzy (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994, Nóbrega 2003) consegue comportar uma escala contínua de pertinência aos conjuntos, variando

de um (pertinência total) até zero (não pertinência total). Valores muito altos serão anômalos, possuindo uma pertinência fuzzy (*fuzzy membership*) “1”, enquanto valores muito baixos ou abaixo do background terão pertinência fuzzy “zero”. Entre estes dois extremos existe toda uma faixa de possíveis valores de pertinência (Figura 15). O membership reflete o grau de verdade para uma hipótese. Para a definição da função de membership é necessário definir um limiar para não anômalos e anômalos, variando entre talvez e provavelmente, e os valores entre os dos extremos. Após a definição da função dos membros fuzzy, para cada mapa de evidências os operadores E, OU, SOMA, PRODUTO e GAMA são aplicados.

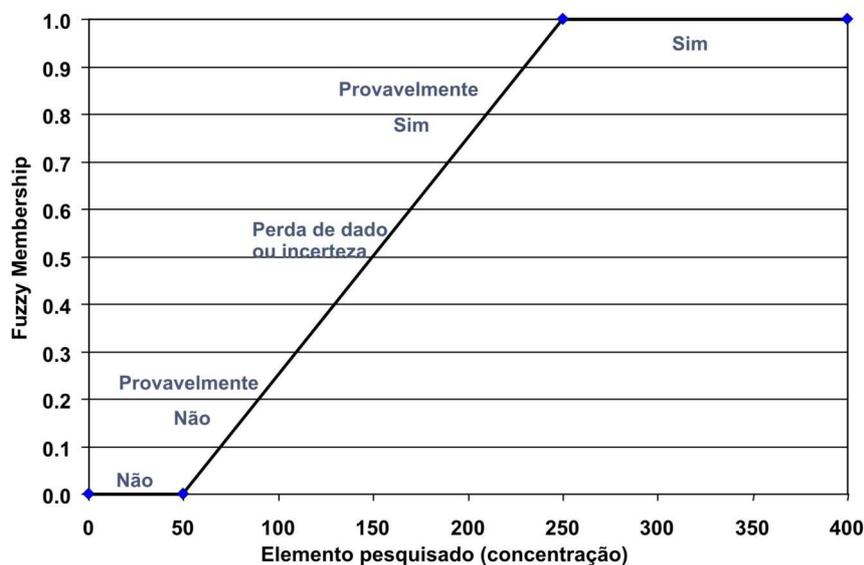


Figura 15 – Função aplicada pelo método Fuzzy, indicando os níveis de pertinências e a probabilidade de assertividade no dado (exemplo extraído de Bonham-Carter *et al.*, 1994).

A técnica foi aplicada para o Bloco Sul e o resultado confrontado com dados de mineralização cedidos pela Verena. Neste bloco a mineralização encontra-se associada ao contato granito-greenstone localizado na borda sul. Vários modelos foram testados para a área em apreço com especial destaque para o modelo de alteração hidrotermal.

Os produtos utilizados para este modelo estão retratados na tabela 3. Destaca-se o uso de pertinência para o mapa geológico-geofísico (Ruy *et al.* 2009), onde os

pesos foram estabelecidos de acordo com proximidade do contato granito-greenstone, unidades próximas ao contato com receberam pertinência 0,9. Unidades associadas a outros granitóides receberam 0,5 e unidades sem associação espacial com a mineralização tais como sedimentos quaternários e charnoquitos receberam valores 0,1. Para a alteração hidrotermal, calculamos o potássio anômalo, técnica desenvolvida por Pires (1995) que consiste na retirada da influência de outros canais sobre o potássio. Essa técnica apresentou boa correlação com as áreas mineralizadas devido à potassificação no processo hidrotermal. O resultado da técnica para a área total é ilustrado na figura 16.

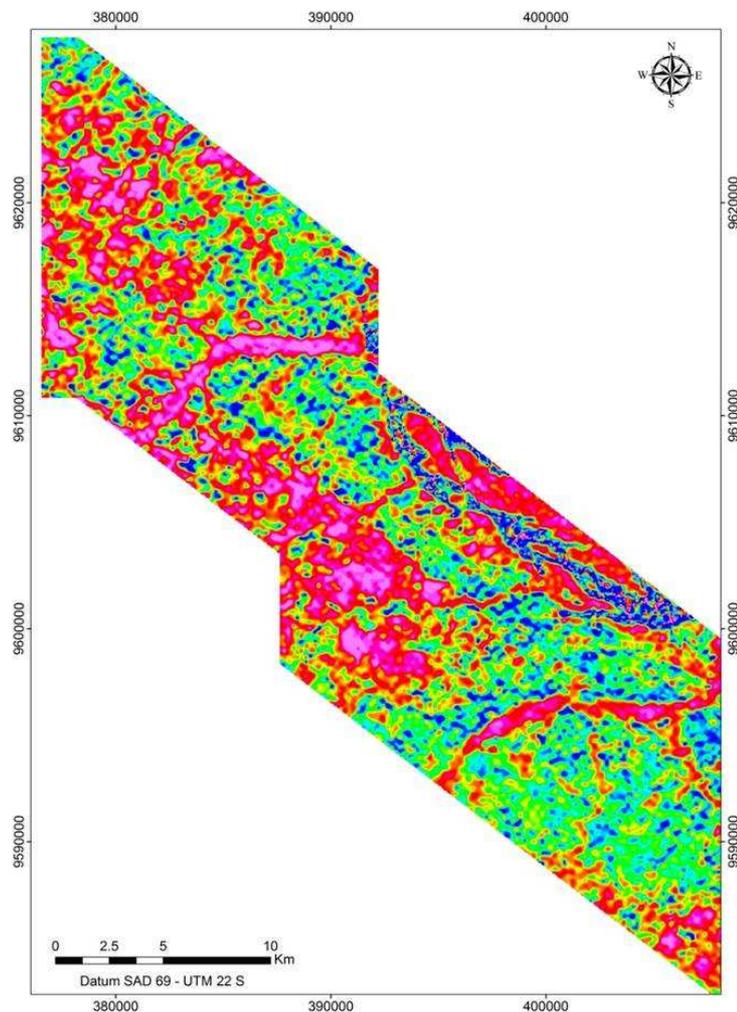


Figura 16 – Potássio Anômalo aplicado para a área. Destaca-se a presença de regiões bem enriquecidas em potássio.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados para a fuzificação.

Camadas utilizadas	Função
Mapa geológico, gerado na interpretação sobre dados K, Th e U	Dado categórico
Amplitude do sinal analítico (ASA)	Small
Potássio anômalo	Large
Gradiente horizontal longitudinal (GY)	Small

O modelo utilizado no bloco sul para a técnica de Lógica Fuzzy foi esquematizado na figura 17. Foram empregados dois tipos de operadores no modelo soma e gama, com o fator 0.7. O resultado do modelo gerado, figura 18, evidencia áreas com potencial promissor.

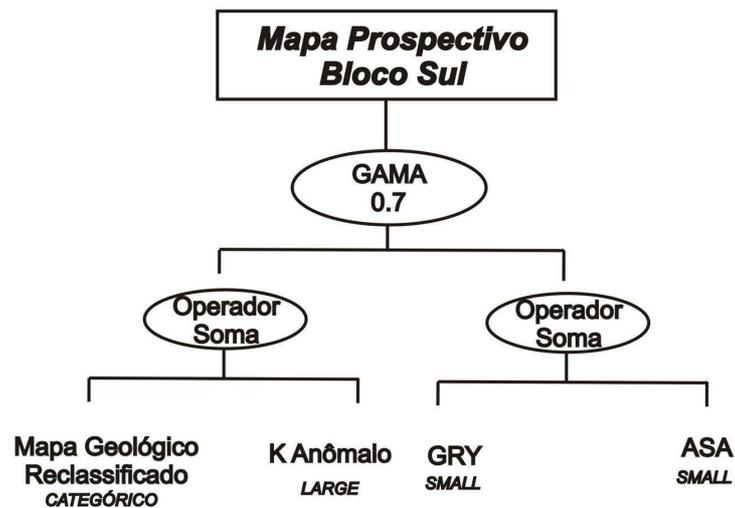


Figura 17 – Produtos utilizados para a confecção do modelo fuzzy.

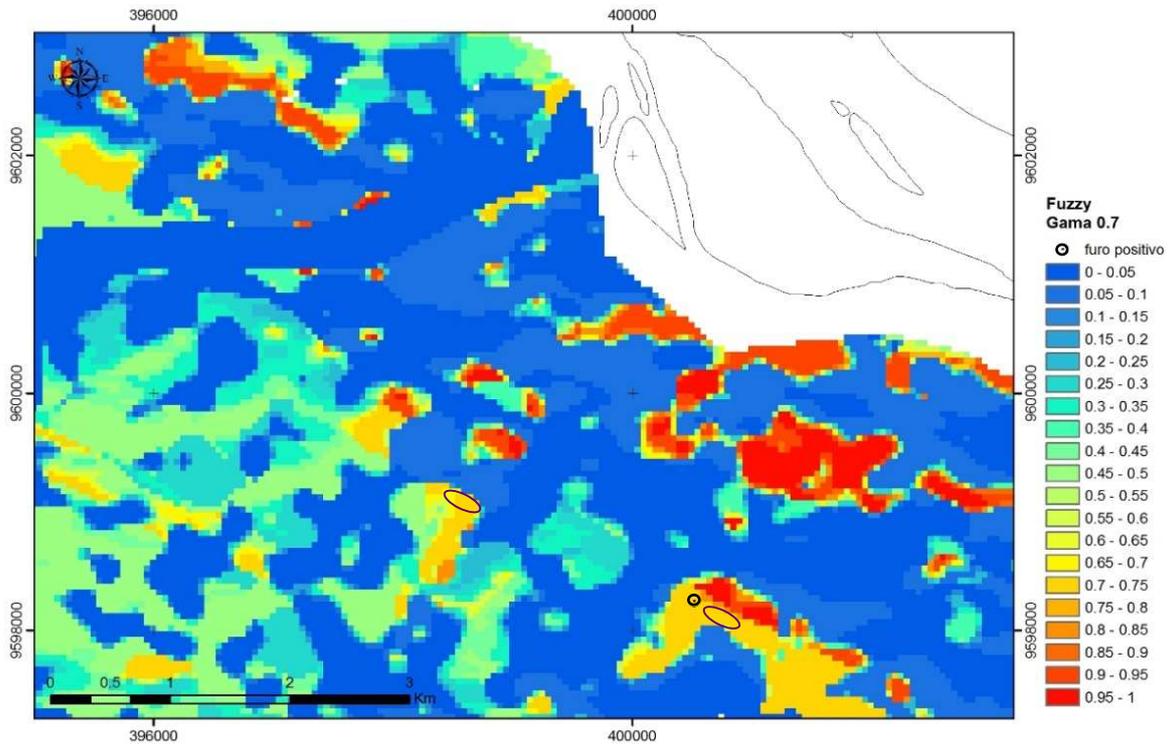


Figura 18 – Mapa prospectivo para ouro utilizando lógica fuzzy. O modelo foi concebido utilizando mapa geológico interpretado da geofísica, amplitude do sinal analítico, gradiente horizontal longitudinal e o mapa de potássio anômalo.

O modelo gerado foi satisfatório na caracterização da zona de cisalhamento situada na borda sul do *greenstone belt*. É possível notar uma série de corpos com direção NW-SE alinhados, com as mesmas características do ponto mineralizado, localizados sobre o polígono roxo, esta região foi evidenciada como positiva em furos de sondagem e malhas de geoquímica de solo. As checagens de campo não foram realizadas nas regiões com assinatura em coloração vermelha, a NE da área.

CONCLUSÕES

As técnicas de modelagem espacial são capazes de incorporar e integrar interpretações geológicas com dados geofísico-geoquímicos, ampliando a capacidade previsional para mapas de prospecção resultantes de módulos GIS. Deste modo, o sucesso na delimitação de áreas já conhecidas como mineralizadas e a indicação de novas regiões visa reduzir significativamente as dimensões das áreas em exploração.

Sabidamente a Sequência Três Palmeiras apresenta potencial para mineralização aurífera associada ao contato *greenstone belt* – granitóide. Este utilizou diversas técnicas para o mapeamento da prospectividade mineral na porção sudoeste do Domínio Bacajá.

A técnica SAM apresentou bons resultados para a área nos dois modelos propostos, ressaltando áreas com respostas semelhantes à assinatura de referência mineralizado. A aplicação da técnica de peso de evidência só foi possível para o bloco norte, onde há disponibilidade de um número maior de pontos de treinamento. Após a reclassificação dos dados originais e aplicação do WofE o resultado apresentou bom desempenho na localização dos corpos mineralizados já conhecidos. A aplicação do Petromapa, baseado em aplicação de rede neural foi eficiente na delimitação de classes para o ambiente mineralizado no bloco norte.

O modelo de Lógica Fuzzy apresentado foi concebido após análise do comportamento do bloco sul. Neste bloco a mineralização esta associada ao contato sul do *greenstone belt* com granitóide. O adicional resultante desta modelagem foi a definição de áreas análogas ao ponto mineralizado, que possuem potencial comprovado através de furos de sondagem e geoquímica de solo.

A integração da geofísica com a geologia, através de aplicação de técnicas de modelagem, foram bem sucedidas na delimitação de áreas já conhecidas como mineralizadas e também efetivas na delimitação de novos alvos, sendo uma ferramenta importante na redução de área para exploração.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais a empresa Verena Mineração *Ltda.*, nas pessoas de Walid El Koury Daoud, Jad Salomão Neto e Elmer Prata Salomão, pela concessão dos dados aerogeofísicos geológicos, seções e fotos, assim como pelas discussões sobre a geologia da área. Ao LGA-UnB pela infra-estrutura e a UnB pela concessão do mestrado. A segunda autora agradece a bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGNERIAN H. 2005 Technical Report on the Volta Grande gold proprieties- Prepared by Verena Minerals Corporation. Relatório Técnico- 85p.
- AGTERBERG F.P. & CHENG Q. 2002. Conditional Independence Test for Weights-of-Evidence Modelling. *Natural Resources Research*, **11(4)**: 249 – 255.
- AN P., MOON W.M., RENCZ A. 1991. Application of Fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, **27(1)**: 1-11
- BARROS C. E. C. M., MACAMBIRA M.J.B., SANTOS M.C.C.S., SILVA D.C., PALMEIRA, L.C.M., SOUSA M.M. 2007. Estruturas sinmagmáticas e idade de zircão de granitos (evaporação de Pb) paleoproterozóicos da parte leste do domínio Bacajá, Província Maroni Itcaíunbas. *Rev. Bras. Geoc.*, **37(2)**: 293-304.
- BONHAM-CARTER G.F. BROWN W.M., GEDEON T.D., GROVES D.I., BARNES R.G. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists – Modelling with GIS*. Pergamon, 400p.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT D.F. 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **54(11)**: 1585-1592
- CARRINO T.A., SOUZA FILHO C.R., LEITE E.P. 2008. Cartografia do potencial de Au-Pd-Pt e EGP-Cr-Ni na região de Serra Leste (Carajás) utilizando-se a técnica ACP e classificadores hiperespectrais. *Rev. Bras. Geoc.*, **38**: 502-514
- DAOUD W.K. 2005. Relatórios internos Verena Mineração sobre mineralização aurífera no Volta Grande do Xingu.
- FARACO M.T.L., VALE A.G., SANTOS J.O., LUZARDO R., FERREIRA A., OLIVEIRA M., MARINHO P.A.C. 2005. Levantamento Geológico da Região ao Norte da Província Carajás. *In: Horbe A. M. C. & Souza W. S. (Org.) Contribuições à Geologia da Amazônia*, v. 4, p.: 32-47.
- JORGE JOÃO X. da S., VALE A.G., LOBATO T. de A.M. 1987. Altamira: folha SA.22-Y-D, Estado do Pará. Texto explicativo, escala 1:250.000. Brasília: DNPM/CPRM, 1987. 31 p.

- KRUSE F.A., LEFKOFF A.B., BOARDMAN J.B., HEIDEBRECHT K.B. SHAPIRO A.T., BARLOON P.J., GOETZ A.F.H. 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, **44**:145-163.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. 2007. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Área Volta Grande. v 1.
- LOONEY C.G, YU H., 2000. Special software development for Neural Network and Fuzzy Clustering analysis in Geological Information Systems. Geological Survey of Canada, 34p.
- MACAMBIRA M.J.B., BARROS C.E.M., VASQUEZ M.L., SILVA D.C.C. 2004. Investigação do limite Arqueano-Paleoproterozóico ao norte da Província de Carajás, Amazônia Oriental. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, p. 97-99.
- MAGALHÃES, L.A. 2008. Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações auríferas na região de Amapari (Amapá) Dissertação de Mestrado. Campinas, SP. X p.
- MIETHKE C., SOUZA FILHO C.R., SILVA A.M. 2007. Assinatura geofísica e modelos prospectivos ‘knowledge-driven’ de mineralizações de Au no lineamento Congonhas, sul Cráton São Francisco, MG. *Rev. Bras. Geoc.*, **37(3)** : 490-503
- NÓBREGA R.P., SOUZA FILHO C.R. 2003. Análise espacial guiada pelos dados (data-driven: o uso de redes neurais para a avaliação do potencial poli-minerálico na região centro-leste da Bahia. *Rev. Bras. Geoc.*, **33(2)**: 111-120.
- NÓBREGA R.P. 2001. Análise espacial “knowledge-driven” e “data-driven”: o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 72p.
- NYKÄNEN V., OJALA V.J. 2007a. Spatial analysis techniques as successful mineral-potential mapping tools for orogenic gold deposits in the Northern Fennoscandian Shield, Finland. *Natural Resources Research* **16 (2)**: 85–92.
- NYKÄNEN V., RAINES G.L., SALMIRINNE H., OJALA J., EILU P. 2006. Spatial modelling as a tool for mineral prospectivity analysis in Finland. *In*: Peltonen, P. &

- Pasanen, A. (eds.) The 27th Nordic Geological Winter Meeting, January 9–12, 2006, Oulu, Finland: Abstract Volume. Bulletin of the Geological Society of Finland. Special issue (1), 113 p.
- NYKÄNEN V.M., OJALA V.J. 2007b. Spatial data mining techniques as mineral exploration tools: examples from gold exploration in the northern Fennoscandian Shield, Finland. In: Andrew et al. (eds.) Digging deeper: Proceedings of the Ninth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Dublin, Ireland 20th–23rd August 2007. Dublin: Irish Association for Economic Geology, p. 481–484.
- PIRES A.C.B., SILVA C.A., MORAES R.A.V., FRANCO H.A., SILVA L.G. 2005. Classificação de corpos intrusivos na região de Coromandel (MG) com apoio de dados magnéticos e gamaespectrométricos: resultados preliminares. *In: Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante e II South American Symposium on Diamond Geology*. Diamantina, MG, v. 1. p. 117-120.
- RUY, A.C, MOREIRA, A.S., DAOUD, W.K. 2009. Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos na caracterização geológico-geofísica do terreno granito-greenstone belt Três Palmeiras, Pará. *Revista Brasileira de Geofísica*. No prelo.
- SANTOS J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C, Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (eds.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, mapas e SIG*. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. p.169-226.
- SAWATZKY D.L., RAINES G.L., BONHAM-CARTER G.F. 2009. Spatial Data Modeller. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/sdm/>. Acessado em: Setembro 2009.
- SOUSA C.S. de, SILVA R.C.S. 2007. Integração de dados aerogeofísicos (magnetometria) e de sensores remotos para a extração de lineamentos da região ao norte de Carajás, Província Maroni-Itacaiúnas. *In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. p.2199-2206.
- SOUZA FILHO C.R., CRÓSTA A.P. 2003. Geotecnologias Aplicadas à Geologia. *Rev. Bras. Geoc.*, **33 (2)**: 1-4
- TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22(3)**:174-182
- TEIXEIRA A.A., SILVA A.M., Pires A.C.B., Moraes R.A.V., Souza Filho C.R. 2006 . Integração e análise de dados aerogeofísicos através da aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e classificação não supervisionada: O exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**: 559-572

- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., ARMSTRONG R.A. 2008. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research* **16**:1279–302
- VASQUEZ M.L., MACAMBIRA M.J.B., GALARZA M. A.2005. Granitóides Transamazônicos da Região Irixi-Xingu, Pará: Novos dados geológicos e geocronológicos. *In*: Horbe A.M.C., Silva Souza V. da (Org.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. v. 4, p. 16-31.
- VASQUEZ M.L., ROSA COSTA L.T., SILVA C.M.G, KLEIN E.L.2008. Compartimentação Tectônica (Geologia e recursos Minerais do Estado do Pará). *In*: Vasquez, M.L.; Rosa-Costa, L.T. (Org.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Belém: CPRM, v., p. 39-112.
- VASQUEZ M.L. 2006. Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: Evolução crustal da porção meridional da Província Maroni Itacaiúnas - sudeste do Craton Amazônico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 234p.