



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**ANÁLISE DOS PADRÕES GEOFÍSICOS DE ZONAS DE CISALHAMENTO  
ENRIQUECIDAS EM GRANADA, MUNICÍPIO DE SÃO VALÉRIO DA NATIVIDADE,  
TO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº147

ÁDILA FERNANDES COSTA

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
Co-orientadora: Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Brasília-DF, Dezembro de 2018.

**ÁDILA FERNANDES COSTA**

**ANÁLISE DOS PADRÕES GEOFÍSICOS DE ZONAS DE  
CISALHAMENTO ENRIQUECIDAS EM GRANADA, MUNICÍPIO DE  
SÃO VALÉRIO DA NATIVIDADE, TO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Geofísica Aplicada.

**Orientador:** Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
**Coorientadora:** Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

Brasília-DF  
Dezembro de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, Ádila Fernandes

Análise dos padrões de zonas de cisalhamento enriquecidas em granada, município de São Valério da Natividade, TO. Ádila Fernandes Costa; orientação: Welitom Rodrigues Borges e coorientação: Adalene Moreira Silva – Brasília, 2018.

77p.

Dissertação de Mestrado nº 147 - Universidade de Brasília / Instituto de Geociências, 2018.

1. Aerogeofísica; 2. São Valério da Natividade; 3. Granada.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, A. F. Análise dos padrões geofísicos de zonas de cisalhamento enriquecidas em granada, município de São Valério da Natividade, TO. 2018. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília - DF. 77p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ádila Fernandes Costa

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise dos padrões geofísicos de zonas de cisalhamento enriquecidas em granada, município de São Valério da Natividade, TO.

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Ádila Fernandes Costa

**ÁDILA FERNANDES COSTA**

**ANÁLISE DOS PADRÕES GEOFÍSICOS DE ZONAS DE CISALHAMENTO  
ENRIQUECIDAS EM GRANADA, MUNICÍPIO DE SÃO VALÉRIO DA NATIVIDADE,  
TO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Geofísica Aplicada.

19 de dezembro de 2018.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (Presidente)

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR)

Profª. Dra. Adriana Chatack Carmelo (IG/UnB)

Dedico esta Dissertação à minha filha Mariana.

“Olhar para trás, após uma longa caminhada, pode fazer perder a noção da distância que percorremos. Mas, se nos detivermos em nossa imagem, quando iniciamos e ao término, certamente nos lembraremos de quanto nos custou chegar até o ponto final, e, hoje, temos a impressão de que tudo começou ontem.”

João Guimarães Rosa

## AGRADECIMENTOS

À minha filha **Mariana**, que nessa longa caminhada até a finalização da dissertação, foi forte e companheira. É tão pequenininha e já quer ir para o campo ☘.

Aos meus queridos pais e irmão por todo apoio.

À minha amiga Liana e outros amigos e colegas da UnB, Nonato, Luciano, Carol, Lila, Mariana e Marina que ajudaram ou cederam as suas instalações para que eu pudesse dormir.

As surpresas da vida (Magda e Cris) por toda amizade e companheirismo até o final da dissertação.

Ao diretor acadêmico e professor José Ivan (FINOM) por todo apoio no ano de 2018.

Aos colegas e amigos de pós-graduação, principalmente Franciele, Darby, Walczuk, Alice e Jéssica (Paraná) que me ajudaram ou resolveram problemas com os *softwares*.

Ao Hisahiro Cláudio pelas informações e o seu desempenho em ajudar nos trabalhos de campo.

Aos funcionários, ao membro docente e aos dirigentes do Instituto de Geociências da UnB que de alguma forma contribuíram para a realização da dissertação. Em especial, ao Freitas-Silva pela sua companhia no reconhecimento geológico da área e ao professor Elói pela sua dedicação à vida acadêmica e o seu incentivo.

Aos professores Welitom Borges e Adalene Silva pelas orientações e sugestões e também aos professores da banca pelas observações e correções.

A CAPES pela bolsa de estudo durante o último ano de mestrado.

COSTA, A. F. Análise dos padrões geofísicos de zonas de cisalhamento enriquecidas em granada, município de São Valério da Natividade, TO. 2018. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77p.

## RESUMO

A região de São Valério da Natividade (TO) é reconhecida internacionalmente pelas ocorrências de granadas, em especial, a espécie *rodolita*, valorizada na indústria joalheira pelas suas características gemológicas raras. A única jazida de rodolita da área de pesquisa, onde porfiroblastos de granada ocorrem disseminados em xisto hidrotermalizado rico em potássio, é um dos poucos depósitos no mundo com produção em larga escala. O potencial mineral e o restrito conhecimento geológico da região estimulou o uso de dados aéreos de magnetometria e gamaespectrometria, de modo a identificar novas áreas mineralizadas e depósitos de granada. Os resultados aerogeofísicos integrados aos dados geológicos e modelo digital do terreno mostram que as ocorrências de granada são subordinadas a um nítido controle termotectônico associado à zona de cisalhamento dúctil e granitogênese brasileira acompanhada de processos hidrotermais. Essas zonas de cisalhamento funcionaram como condutos dos fluidos hidrotermais e contribuíram para a concentração de K em armadilhas geoquímicas, que permitiram, possivelmente, a formação da rodolita. Sobre a área da mina há anomalias de K, ressaltadas nas imagens do parâmetro F e K anômalo, consideradas a principal feição indicadora de áreas promissoras para ocorrência da granada. O mapa de potencialidade do Fator F foi gerado por meio da técnica de classificação não supervisionada e um conjunto de alvos foi selecionado com assinaturas geofísicas similares a da mina.

**Palavras-chave:** Aerogeofísica, São Valério da Natividade, Rodolita.



COSTA, A. F. 2018. Analysis of the geophysical patterns of shear zones enriched in garnet city of São Valério da Natividade, TO. Master's Dissertation, Institute of Geosciences, University of Brasilia, Brasília-DF, 77p.

## **ABSTRACT**

The region of São Valério da Natividade (TO) is internationally recognized for the occurrence of garnets, especially the rhodolite specie, which is valued in the jewelery industry due to its rare gemological characteristics. The only rhodolite deposit in the research area, where garnets porphyroblasts occur in hydrothermal shale rich in potassium, is one of the few deposits in the world with large scale production. The mineral potential and the restricted geological knowledge of the region stimulated the use of aerial data of magnetometry and gamma spectrometry in order to identify new mineralized areas and garnets deposits. The aerogeophysical results integrated to the geological data and the digital terrain model show that the occurrences of garnet are subordinated to a clear thermotectonic control associated to the zone of ductile shear and brazilian granitogenesis accompanied by hydrothermal processes. These shear zones functioned as conduits of the hydrothermal fluids and contributed to the concentration of K in geochemical traps, wich possibly allowed formation of rhodolite. On the area of the mine there are anomalies of K, highlighted in the images of the parameter F and anomalous K, considered the main feature indicating areas promising for garnet occurrence. The F Factor potential map was generated using the unsupervised classification clusters pixels and a set of targets was selected with geophysical signatures similar to the mine.

**Keywords:** Aerogeophysics, São Valério da Natividade, Rhodolite.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Objetivo .....	2
1.3 Localização e Acesso à Área de Estudo .....	2
1.4 Materiais e Métodos .....	3
1.4.1 Materiais.....	3
1.4.2 Métodos .....	8
CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	14
2.1 Apresentação.....	14
2.2 Geologia Regional .....	14
2.2.1 Unidades Litoestratigráficas.....	15
2.3 Província Geomológica de São Valério da Natividade .....	21
2.4 Geologia Local.....	21
CAPÍTULO III. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS.....	27
3.1 Apresentação.....	27
3.2 Pré-processamento .....	27
3.3 Processamento .....	28
3.3.1 Dados Magnetométricos.....	28
3.3.2 Dados Gamaespectrométricos.....	40
3.4 Interpretação dos Dados Aerogeofísicos.....	50
3.4.1 Produtos Magnetométricos .....	50
3.4.2 Produtos Gamaespectrométricos .....	54
CAPÍTULO IV. ASSINATURAS GEOFÍSICAS E DISCUSSÃO .....	60
CAPÍTULO V. CONCLUSÕES E MAPA DE POTENCIALIDADE.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Mapa de localização e vias de acesso para a área de pesquisa.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 1.2 - Recorte das cartas geológicas Gurupi e Bananal. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3 - Localização das ocorrências de granada na área de pesquisa.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1.4 - Localização da área do Projeto Aerogeofísico Tocantins e área de pesquisa.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.5 – Mapa usado para o reconhecimento geológico do trend de ocorrências de granada com os pontos de afloramento identificados pelas unidades geológicas registradas.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.6 - Espectro de raios gamas com os fotopicos de maior intensidade e as posições das janelas energéticas dos radioelementos potássio, urânio e tório e da contagem total. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1.7 - Variações de teores dos radioelementos potássio, urânio e tório para rochas ígneas com o incremento de sílica.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.8 - Fluxograma das etapas do processamento de dados magnetométricos e os seus produtos finais.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.9 - Fluxograma das etapas do processamento de dados gamaespectrométricos e os seus produtos finais.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.1 - Mapa Geotectônico da Província Tocantins .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.2 - Compartimentação do embasamento da porção setentrional da Faixa Brasília.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.3 - Sistemas de riftes implantados nas províncias São Francisco e Tocantins .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.4 - Fotografias de afloramentos de rocha exibindo injeções graníticas e veios de quartzo boudinados e estirados.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.5 - Fotomicrografias de lâminas delgadas dos litotipos observados em campo. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.6 - Fotografias de fragmentos de rocha.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.7 - Fotomicrografias de lâminas delgadas do minério.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.1 - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.2 - Mapa do campo magnético reduzido ao polo (CMA-RTP) da área de trabalho e CMA-RTP com continuação ascendente (UW) de 200 (B), 300 (C) e 500 metros (D). ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.3 - Mapa da derivada horizontal (Dx) do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.4 - Mapa da derivada horizontal (Dy) do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.5 - Mapa da derivada vertical (Dz) do campo magnético anômalo reduzido ao polo (A) e com continuação ascendente de 200 (B), 300 (C) e 500 metros (D) da área de estudo. ....</i>	<i>35</i>

<i>Figura 3.6 - Mapa da amplitude do sinal analítico do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.</i> .....	36
<i>Figura 3.7 - Mapa do gradiente horizontal total do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.</i> .....	37
<i>Figura 3.8 - Mapa da inclinação do sinal analítico do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.</i> .....	38
<i>Figura 3.9- Os mapas do Gradiente Horizontal total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA)(A) e da Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT) (B) da área de estudo.</i> .....	40
<i>Figura 3.10 - Mapa da imagem contagem total da área de estudo.</i> .....	41
<i>Figura 3.11 - Mapa da imagem do canal de potássio da área de estudo.</i> .....	42
<i>Figura 3.12 - Mapa da imagem do canal equivalente tório da área de estudo.</i> .....	43
<i>Figura 3.13 - Mapa da imagem do canal equivalente urânio da área de estudo.</i> .....	44
<i>Figura 3.14 - Mapas das razões <math>eTh/K</math> (A), <math>K/eTh</math> (B), <math>eU/K</math> (C) e <math>eU/eTh</math> (D) da área.</i> .....	45
<i>Figura 3.15 - Mapa da imagem do parâmetro <math>F</math> da área de estudo.</i> .....	46
<i>Figura 3.16 - Mapa do potássio anômalo (A) e urânio anômalo (B) da área de estudo.</i> .....	47
<i>Figura 3.17 - Mapas ternários de composição colorida RGB da área de estudo.</i> .....	49
<i>Figura 3.18 - Mapa do CMA-RTP-UW500 metros sobreposto ao MDT da área de estudo</i> .....	51
<i>Figura 3.19 - Mapa de lineamentos magnéticos dúcteis de direção NE e lineamentos rúpteis inferidos de direção SWW-NEE e NWW-SEE da área de estudo.</i> .....	53
<i>Figura 3.20 - Padrão estrutural observado em campo. Notar as três medidas decampo.</i> .....	54
<i>Figura 3.21 - Modelo digital do terreno em 3D elaborado no Oasis Montaj.</i> .....	55
<i>Figura 3.22 - Domínios radiométricos definidos a partir do mapa de composição ternária (RGB) integrado ao mapa de lineamentos da área de estudo.</i> .....	56
<i>Figura 4.1 - Mapa do Fator <math>F</math> com a localização das ocorrências de granada.</i> .....	62
<i>Figura 4.2 - Perfis geofísicos do <math>U_d</math> e <math>K_d</math> da L22750 que intersecta o garimpo Zé Doido e o depósito rodolita.</i> .....	63
<i>Figura 4.3 - Perfis geofísicos do <math>U_d</math> e <math>K_d</math> da L22680 que intersecta o garimpo Schneider.</i> .....	63
<i>Figura 4.4 - Perfis geofísicos do <math>U_d</math> e <math>K_d</math> da L22820 que intersecta a ocorrência 2.</i> .....	63
<i>Figura 5.1 - Classificação não supervisionada através do algoritmo ISODATA com base na classe de valores da legenda do Fator <math>F</math>.</i> .....	65
<i>Figura 5.2 - Alvos prospectivos selecionados.</i> .....	66
<i>Figura 5.3 - Perfis geofísicos do Alvo 01.</i> .....	67
<i>Figura 5.4 - Perfis geofísicos do Alvo 02.</i> .....	67

<i>Figura 5.5 - Perfis geofísicos do Alvo 03.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.6 - Perfis geofísicos do Alvo 04.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.7 Perfis geofísicos do Alvo 05.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.8 - Perfis geofísicos do Alvo 06.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.9 - Perfis geofísicos do Alvo 07.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.10 - Perfis geofísicos do Alvo 08.....</i>	<i>69</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1 - Amostras selecionadas para análise petrográfica. ....</i>	<i>8</i>
---	----------

# I INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

Esta dissertação apresenta as assinaturas geofísicas do ambiente mineralizador das granadas na região de São Valério da Natividade, estado do Tocantins, obtidas a partir do processamento e interpretação de dados magnéticos e gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Tocantins, além do mapa de potencialidade do Parâmetro F.

A região de São Valério da Natividade é reconhecida internacionalmente pelas ocorrências de granadas, em especial, a espécie *rodolita*, valorizada pelas suas características gemológicas raras na indústria joalheira. As granadas também são comercializadas na indústria de abrasivos na substituição de uso de sílica nas atividades insalubres.

De acordo com Winchell (1933), as espécies comuns de granada dividem-se em dois grupos: pirospitas ou aluminosas (piropo, almandina e espessartita) e ugranditas ou cálcicas (uvarovita, grossulária e andradita). Essas espécies finais apresentam fórmula geral dada por  $X_3Y_2Si_3O_{12}$ , onde os cátions  $Fe^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  são comumente posicionados em X e  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Cr^{3+}$  estão geralmente na posição Y (Krippner *et al.*, 2014). Atualmente, 32 espécies de granada são reconhecidas (Grew *et al.*, 2013) e sua nomenclatura mineralógica é baseada na composição dos seis membros finais.

A rodolita, que apresenta composição intermediária almandina-piropo, foi identificada inicialmente por Hidden e Pratt (1898) na Carolina do Norte (EUA). A rodolita de São Valério da Natividade apresenta composição almandina-piropo ( $Alm_{68}Pyr_{30}$ ) com quantidades variáveis de grossulária e espessartita, e zoneamento de cor, onde o núcleo é vermelho e a borda é púrpura (Hoover *et al.*, 2015). Outros depósitos de rodolita são encontrados no leste africano (Simonet *et al.*, 2002).

O restrito conhecimento geológico da região estimulou o uso de dados aéreos de magnetometria e gamaespectrometria, de modo a prospectar novas áreas mineralizadas e depósitos de granada.

Os produtos aerogeofísicos ressaltaram os lineamentos magnéticos de direção NE pertencentes ao Lineamento Transbrasiliano, as feições rúpteis NWW-SEE e NEE-SWW e um campo hidrotermal com concentrações anômalas de potássio e urânio. As evidências de campo confirmaram o ambiente geológico interpretado nos produtos geofísicos, uma zona de cisalhamento composta por xisto milonitizado, especialmente variável para gnaisses, afetada por uma granitogênese acompanhada de processos hidrotermais.

As imagens radiométricas mostram uma anomalia de potássio sobre o depósito de rodolita expressão do xisto biotitizado com granadas.

Posteriormente, foi elaborado o mapa de potencialidade com base na imagem do Fator F através da técnica de classificação não supervisionada para a seleção de alvos potenciais.

## **1.2 Objetivo**

O estudo tem como objetivo principal a análise e interpretação de resultados geofísicos para determinar as assinaturas geofísicas do ambiente mineralizador das granadas da região de São Valério da Natividade.

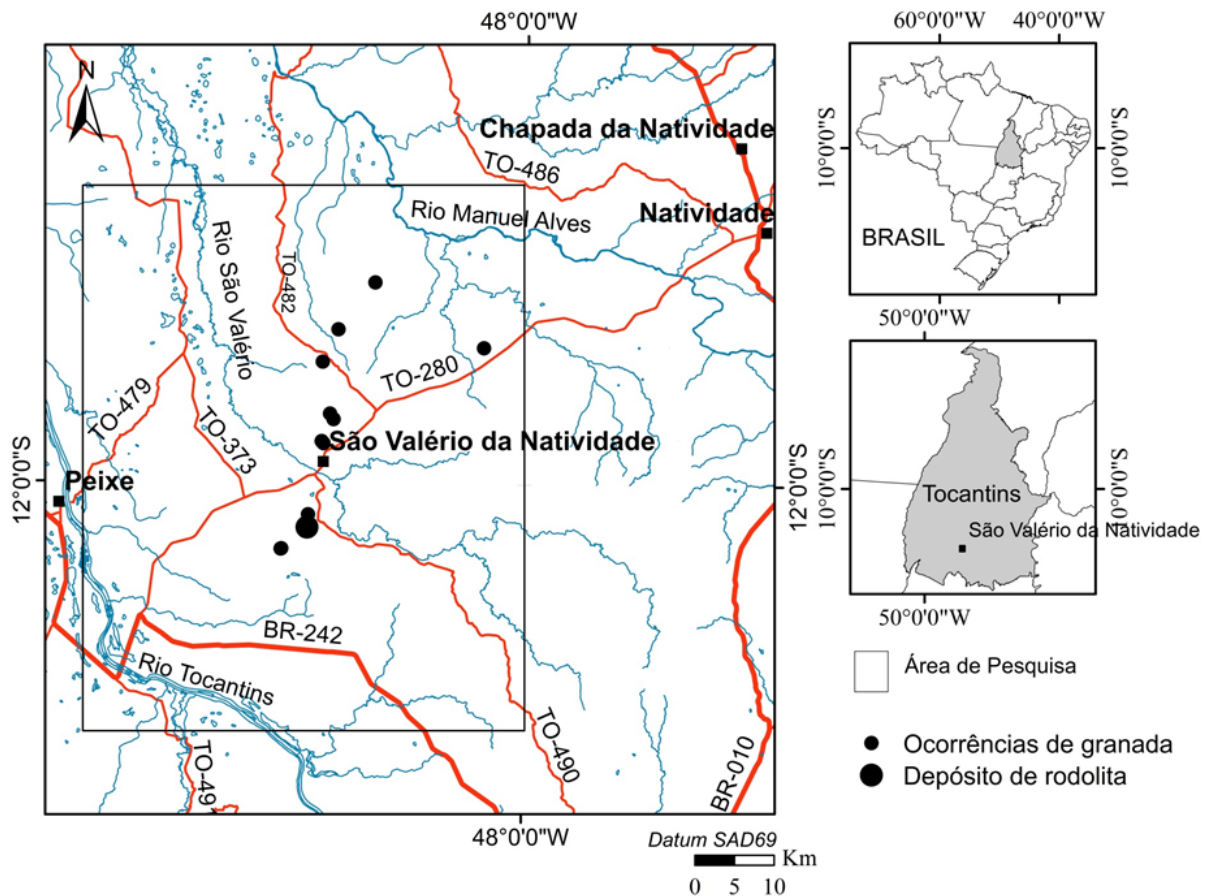
O objetivo principal permitiu traçar as seguintes metas:

- i. Levantamento de dados de ocorrências minerais de granada e pesquisa bibliográfica sobre a geologia da região de estudo;
- ii. Processamento de dados extraídos do Projeto Aerogeofísico Tocantins disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e produção de mapas magnéticos e radiométricos;
- iii. Interpretação dos produtos magnéticos e gamaespectrométricos;
- iv. Reconhecimento geológico das unidades geológicas associadas ao ambiente metalogenético;
- v. Análise petrográfica das unidades geológicas;
- vi. Discussão dos resultados e definição das assinaturas geofísicas do ambiente mineralizador;
- vii. Elaboração de mapa de potencialidade e seleção de alvos para a granada.

## **1.3 Localização e Acesso à Área de Estudo**

A área de estudo localiza-se na porção centro-sul do estado do Tocantins na região do município de São Valério da Natividade. A Figura 1.1 ilustra a localização da área. A área em que a pesquisa foi desenvolvida fica aproximadamente 750 km de Brasília-DF e as principais vias de acesso são por meio da rodovia federal, BR-010, que liga Brasília a Natividade, e rodovia estadual, TO-280, que liga Natividade a São Valério da Natividade.





**Figura 1.1** - Mapa de localização e vias de acesso para a área de pesquisa.

## 1.4 Materiais e Métodos

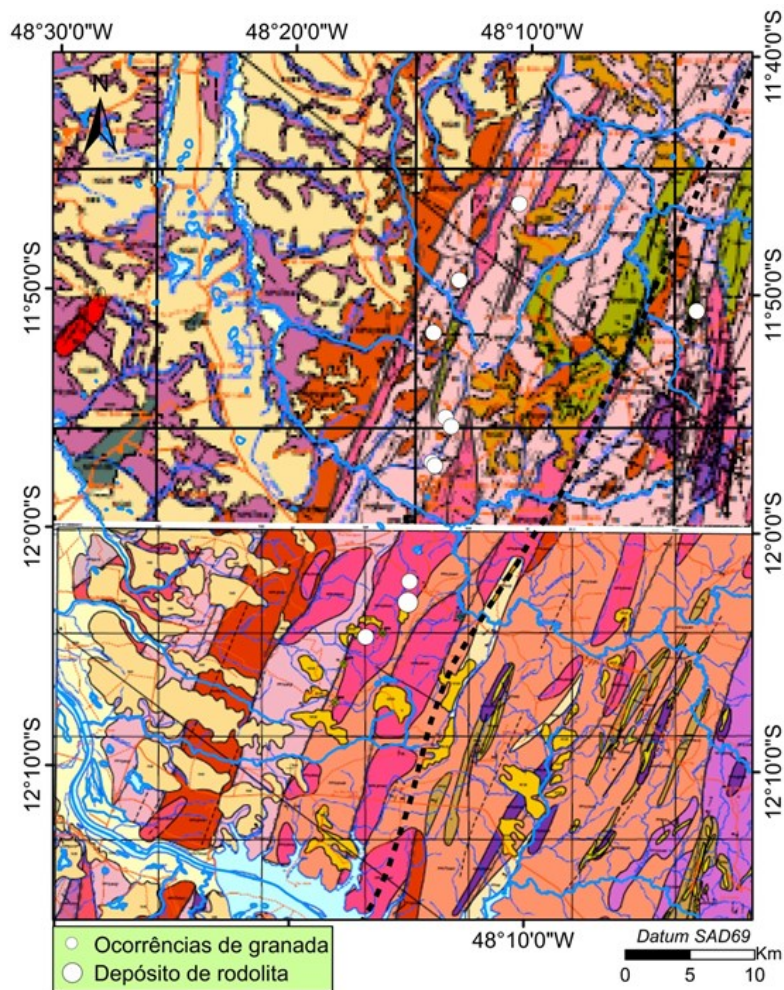
Esta seção apresenta os materiais utilizados para o desenvolvimento da dissertação e os métodos empregados durante o tratamento dos dados geofísicos.

### 1.4.1 Materiais

#### 1.4.1.1 Dados Cartográficos

As bases cartográficas utilizadas consistem nas folhas topográficas Bananal (SD-22-X-B-III) e Apinajé (SC-22-Z-D-VI), ambas na escala 1:100.000, com equidistância das curvas de nível de 40 metros, impressas em 1977 pela Diretoria de Serviços Geográficos - DSG e disponibilizadas pelo Centro de Imagens e Informações Geográficas do Exército, e nas cartas geológicas Gurupi (SD.22-Z-D) em escala 1:250.000 (Frasca *et al.*, 2011) e Bananal (SD.22-X-B-III) em escala 1:100.000 (Frasca *et al.*, 2017), disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil. Os recortes das cartas estão apresentados na Figura 1.3.

As folhas topográficas foram utilizadas para digitalização de altos topográficos no *software* ArcGIS 10.3.



## Neoproterozóico

### Suíte Mata Azul

- Granitos diferenciados, veios de quartzo e hidrotermalito
- Granada biotita-muscovita granodiorito, tonalitos, muscovita-biotita granito e granitos aluminosos deformados.
- Hornblenda granito alcalino, sienogranito, feldspato-alcalino granito e correspondentes miloníticos, muscovita sienogranitos, muscovita-feldspato-alcalino granitos, associados a expressivos pegmatitos quartzo-feldspáticos, greisens pegmatíticos.

### Suíte Manuel Alves

- Tonalitos e granodioritos gnaisses
- Olivina-metagabrorritos, metanoritos e enclaves de granulitos máficos máficos, granada anfibolitos e hornblenda metagabros subordinados.

### Complexo Porangatu

- Unidade 2. Metatonalito, metagranodiorito, hornblenda metagabro e metagranito foliados, estruturas gnáissicas localizadas e veios de quartzo.

## Paleo-Mesoproterozóico

### Grupo Araí

- Muscovita-biotita-quartzo xisto, clorita xisto, biotita muscovita carbonato xisto, quartzo-muscovita xisto, granada-quartzo-muscovita xisto, filito carbonoso, filito rico em magnetita e veios de quartzo.

## Paleoproterozóico

### Suíte Aurumina

- Litofácies 4 - Granito Xobó: biotita-muscovita monzogranito, biotita granodiorito, peraluminoso com textura porfírica a porfiroblástica, estruturas augen, gnáissica e milonítica.
- Litofácies 3: biotita-muscovita gnaiss monzogranítico, granodiorítico e tonalítico, biotita-muscovita migmatito, granada-biotita-muscovita granito, muscovita metatonalito, grossos a médios e estruturas miloníticas

### Complexo Almas-Cavalcante: Unidade Ortognáissica e Granítica

- Gnaisses de composição tonalítica a granodiorítica, bandados, milonitizados, localmente dobrados, com intercalações de bandas ricas em minerais máficos a bandas porfiroclásticas com cristais centimétricos de K-feldspato.

### Grupo Riachão do Ouro

- Pods e restitos de formação ferrífera e manganésifera bandada alternando níveis milimétricos de hematita e magnetita.

Figura 1.2 - Recorte das cartas geológicas Gurupi e Bananal.

### 1.4.1.2 Dados de SRTM

Foram usadas imagens SRTM com resolução de 30 metros, registradas em 23 de setembro de 2014, obtidas no *site Earth Explorer* administrado pelo USGS (*United States Geological Survey*) como auxílio para as interpretações do arcabouço estrutural da área de estudo. A missão topográfica é resultado da cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do Departamento de Defesa dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália, que visou obter um Modelo Digital Terreno (MDT) mundial de alta resolução.

### 1.4.1.3 Dados de Ocorrências Mineraias de Granada de São Valério da Natividade

As localizações das ocorrências foram obtidas por meio da nota explicativa da Folha Gurupi, onde são descritos os garimpos Schneider, Gabi e Zé Doido, e de um titular de alvará de pesquisa. A Figura 1.2 mostra a localização dessas ocorrências na área de pesquisa.

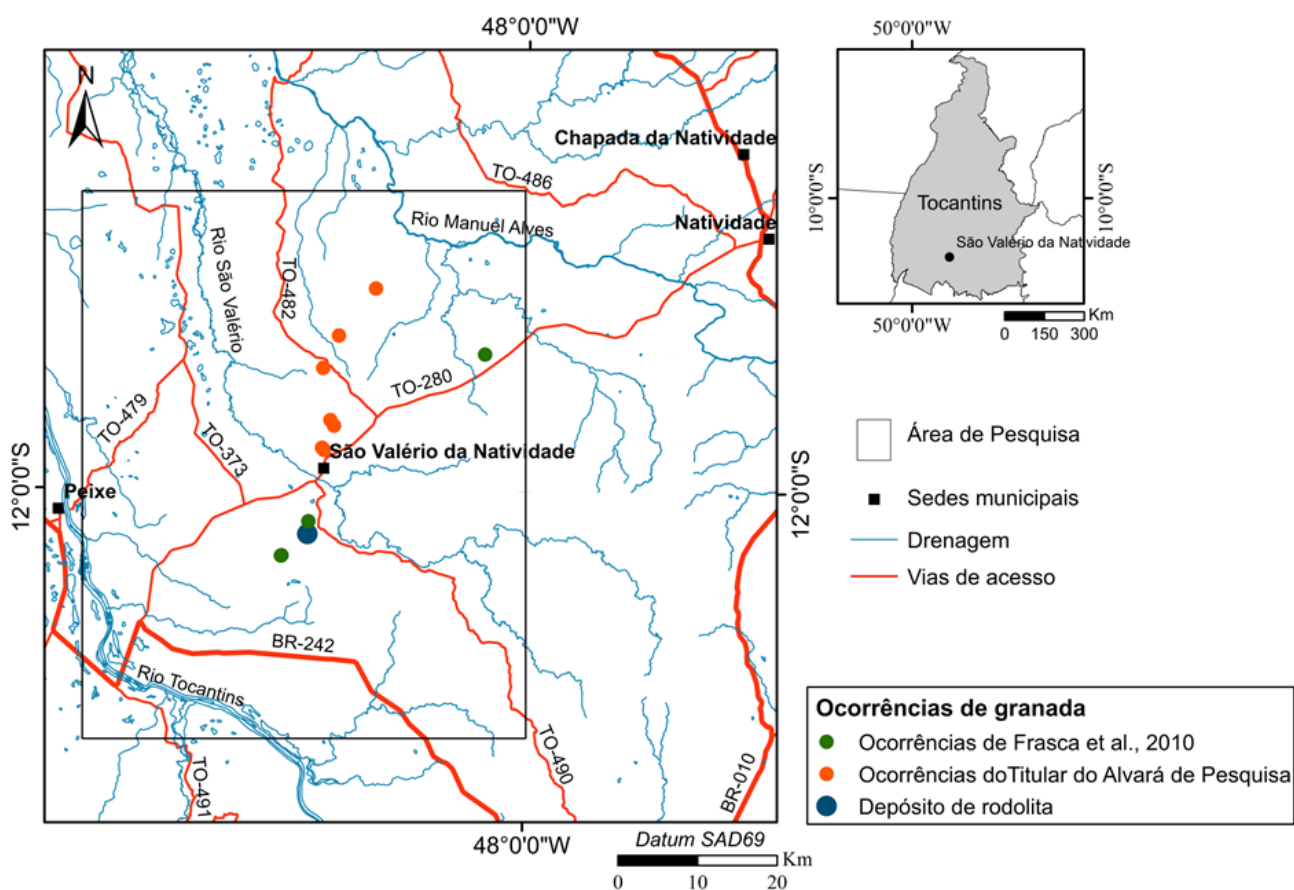
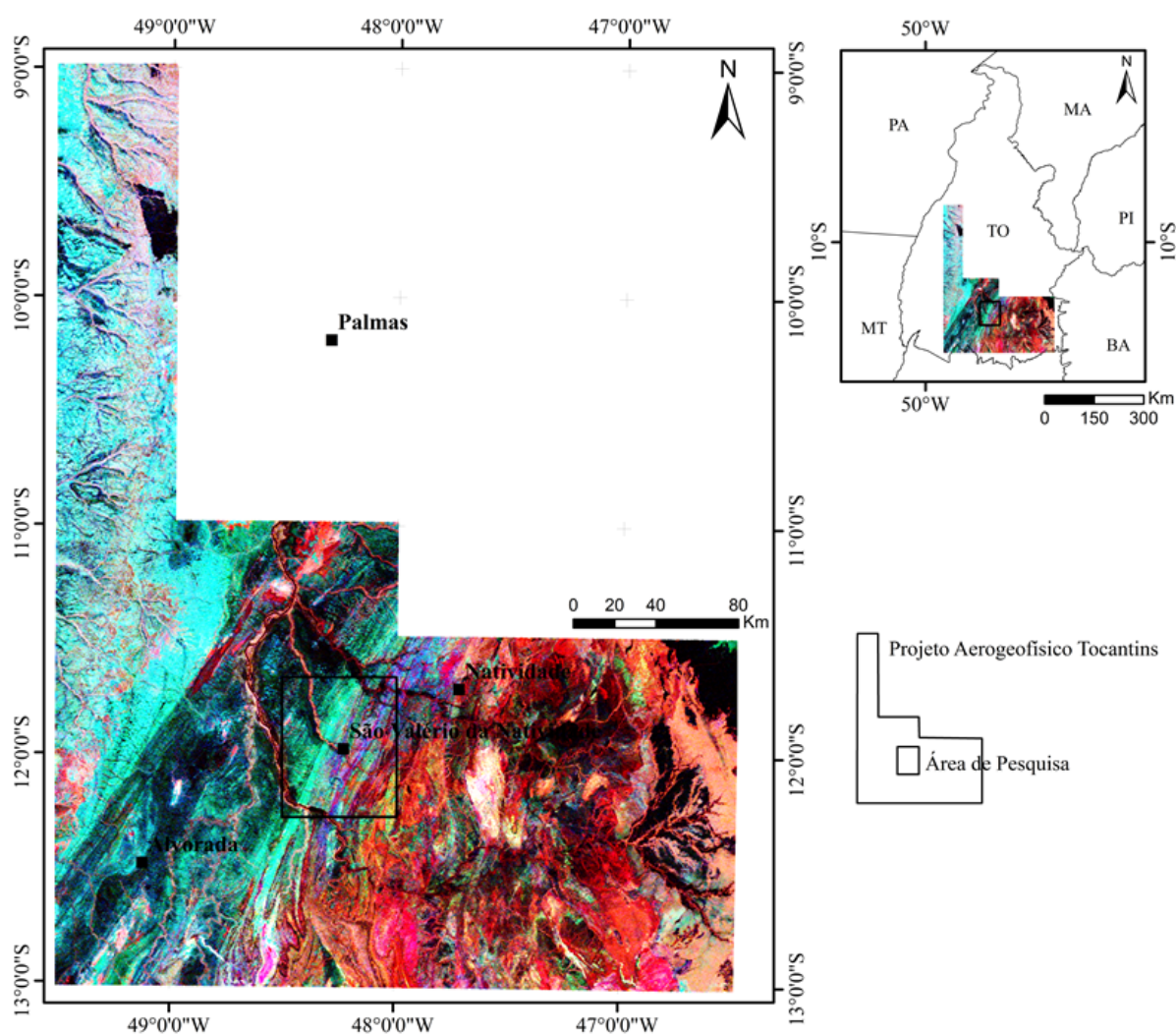


Figura 1.3 - Localização das ocorrências de granada na área de pesquisa.

#### 1.4.1.4 Dados Aerogeofísicos

Os dados magnéticos e gamaespectrométricos foram extraídos do Projeto Aerogeofísico Tocantins que é resultado de uma ação conjunta entre o Ministério de Minas e Energia, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis-ANP e a CPRM visando à realização e disponibilização de Levantamentos Aerogeofísicos em território brasileiro (CPRM, 2006). O aerolevanteamento do Projeto Tocantins foi executado pela empresa AeroGeophysica Latino América (AGP-LA), entre o período de 26 de julho de 2005 e 02 de janeiro de 2006, a altura de voo de 100 metros sobre uma área ao norte do estado de Goiás até a porção centro-sul do estado do Tocantins (Figura 1.4). A aquisição resultou em 164.003 km de perfis lineares com linhas de voo N-S espaçadas em 500 metros e linhas de controle E-W espaçadas em 10 km. Os trabalhos de aquisição de dados do projeto foram supervisionados pela CPRM. As coordenadas do aerolevanteamento foram referenciadas ao Datum SAD 69 e projeção Universal Transversa de Mercator - UTM, Zona 22 e 23 sul (CPRM, 2006).

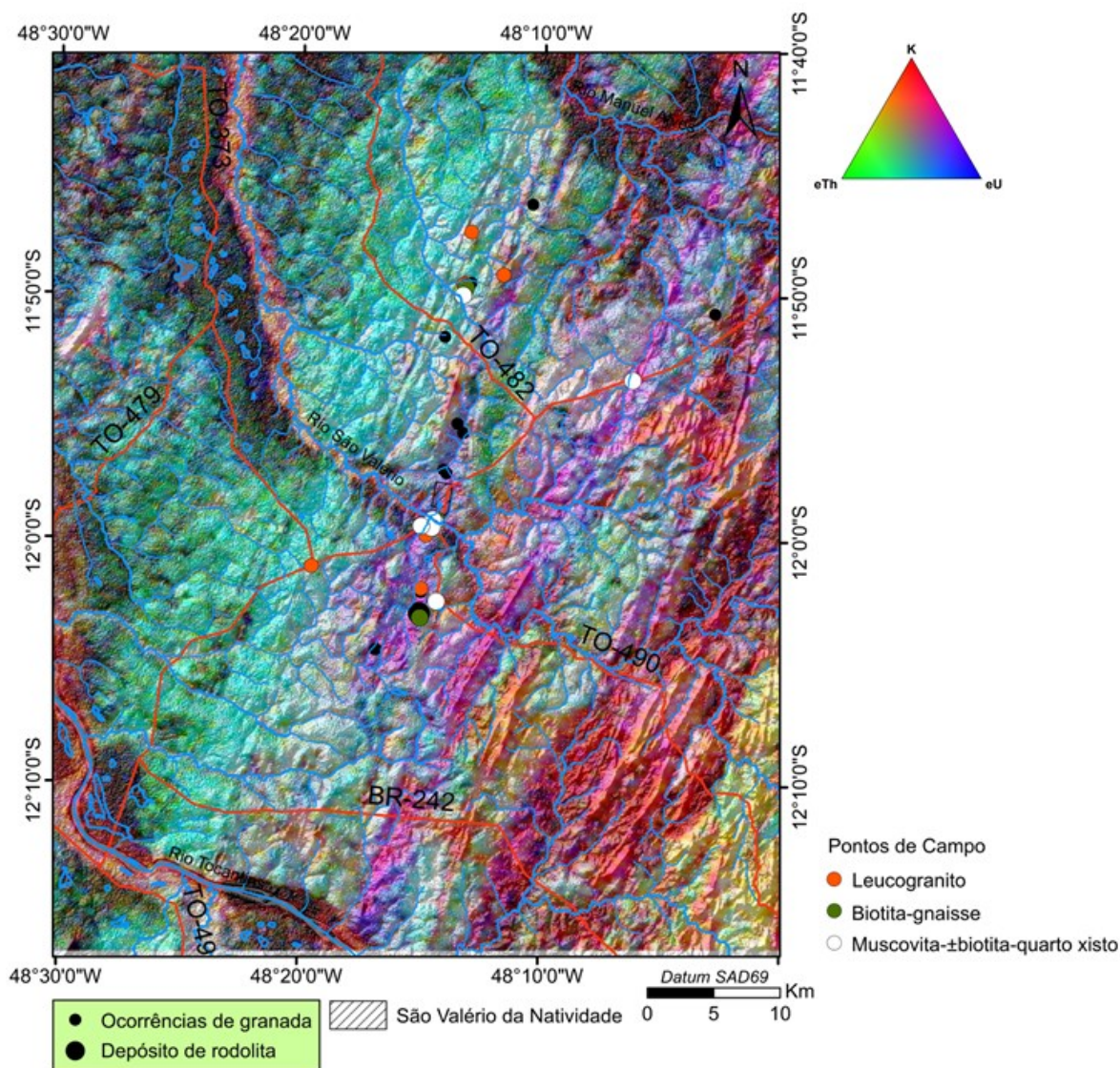


**Figura 1.4** - Localização da área do Projeto Aerogeofísico Tocantins e área de pesquisa.

A aquisição aerogeofísica contou com duas aeronaves equipadas com magnetômetros de bombeamento ótico de vapor de césio da SCINTREX, modelo CS-3 e gamaespectrômetros da PicoEnvirotec, modelo GRS 410, de 512 canais espectrais e sistema de navegação GPS, com receptor Javad Euro GD de dupla frequência e 12 canais. O intervalo das medições foi de 0,01s para o levantamento aeromagnético e de 1,0s para o levantamento aerogamaespectrométrico (CPRM, 2006).

#### 1.4.1.5 Dados de Campo

Os trabalhos de campo de geologia foram realizados em outubro de 2018 para o reconhecimento das unidades geológicas do ambiente mineralizador (*trend* de ocorrências de granada) e identificação do campo hidrotermal ressaltado nos produtos gamaespectrométricos (Figura 1.5).



**Figura 1.5** – Mapa usado para o reconhecimento geológico do *trend* de ocorrências de granada com os pontos de afloramento (em laranja, verde e branco) identificado pelas unidades geológicas registradas.

#### **1.4.1.6 Dados Petrográficos**

Foram selecionadas 5 amostras representativas para a confecção de lâminas delgadas e posterior análise petrográfica (Tabela 1.1). As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília e analisadas no Laboratório de Microscopia do mesmo instituto.

*Tabela 1.1 - Amostras coletadas para análise petrográfica.*

<b>AMOSTRA</b>	<b>LITOTIPO</b>
<b>AD 003</b>	<i>Granito Tipo S</i>
<b>AD 008</b>	<i>Leucogranito protomilonítico</i>
<b>AD 019</b>	<i>Biotita Gnaiss</i>
<b>AD 007A</b>	<i>Minério</i>
<b>AD 007B</b>	<i>Minério</i>

#### **1.4.2 Métodos**

Esta seção apresenta os métodos utilizados para o desenvolvimento da dissertação e sua descrição.

##### **1.4.2.1 Pesquisa Bibliográfica**

Durante a dissertação foram levantadas referências bibliográficas sobre a geologia, a geofísica e ocorrências de granada na região de São Valério da Natividade. Essas referências incluem artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, mapas e relatórios técnicos.

##### **1.4.2.2 Métodos Geofísicos**

Os métodos geofísicos (magnetometria e gamaespectrometria aérea) selecionados para a pesquisa foram motivados por informações preliminares sobre as características geológicas da região de estudo.

Os conceitos básicos sobre os métodos aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria são apresentados a seguir.

#### ***Magnetometria***

O aerolevanteamento magnetométrico baseia-se na medição do campo magnético terrestre (CMT) resultante da sobreposição de três fontes magnéticas distintas (Telford *et al.*, 1976 e 1981):

(1) *campo magnético total* - responsável por 99% do campo magnético terrestre. Sua

origem está relacionada com os movimentos de convecção no interior da Terra, onde se movem fluidos condutivos ricos, principalmente, em ferro e níquel;

(2) *campo magnético externo* - de natureza cíclica e aleatória, tem como origem os fenômenos físicos externos a Terra, como tempestades magnéticas e variações diurnas;

(3) *campo magnético anômalo* - associa-se as anomalias locais do campo magnético da Terra causadas pela concentração anômala de minerais magnéticos presentes nas rochas próximas a superfície terrestre e acima da superfície ou temperatura de *Curie*, na qual cada mineral ferromagnético ao ultrapassá-la perde a sua capacidade de magnetização. O campo magnético anômalo (CMA) é obtido através da subtração do campo geomagnético do núcleo da Terra estimado pelo modelo matemático IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) do Campo Magnético Total (Blakely, 1995).

### **Comportamento Magnético das Rochas**

As rochas são formadas por um conjunto de minerais que apresentam comportamentos magnéticos distintos. Há três tipos de minerais magnéticos:

*Diamagnético* - quando o material submetido a um campo magnético desenvolve uma magnetização fraca e de sentido oposto ao campo aplicado. Quando retirado o campo, a magnetização desaparece. A calcita e o quartzo são exemplos de minerais diamagnéticos.

*Paramagnético* - quando o material submetido a um campo magnético desenvolve uma magnetização proporcional ao campo e paralela à sua direção. Quando retirado o campo, a magnetização cessa. O anfibólio, piroxênio, olivina e biotita são exemplos de minerais paramagnéticos.

*Ferromagnético* - quando o material que apresenta uma capacidade de gerar magnetização espontânea é submetido a um campo magnético, desenvolve uma magnetização intensa, onde os momentos magnéticos são alinhados com a direção do campo indutor. Quando retirado o campo magnético, o material ferromagnético mantém parte da magnetização induzida, denominada de magnetização remanescente, por milhões de anos, mesmo que ocorra uma inversão de polaridade do campo.

Os minerais magnéticos, magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), pirrotita ( $\text{FeS}$ ) e ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), ocorrem na maioria das rochas e nas estruturas geológicas, geralmente, associados com minerais não magnéticos de valor econômico. Deste modo, os dados magnetométricos auxiliam na exploração mineral na identificação do arcabouço estrutural e dos depósitos minerais.

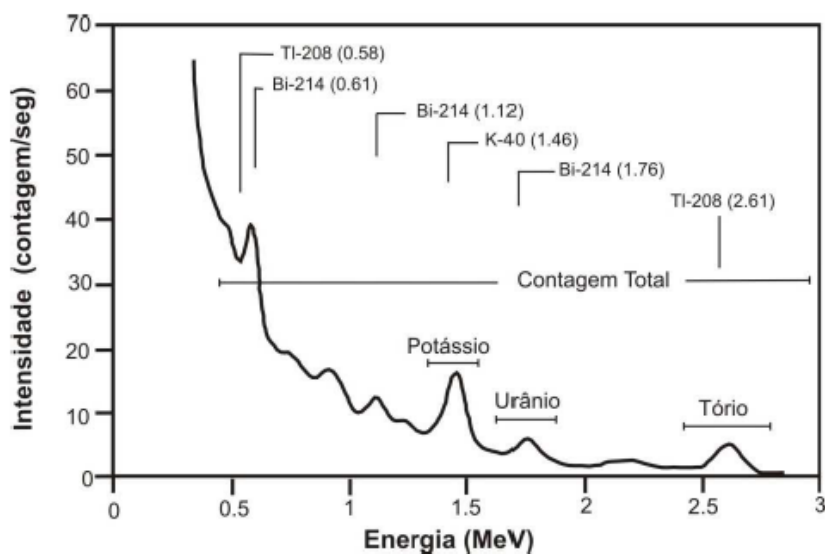
## Gamaespectrometria

O aerolevante gamaespectrométrico consiste em detectar a radiação gama, até 30 cm superiores da superfície da Terra (Dickson e Scott, 1997), resultante da série de desintegração natural dos radioisótopos presentes nas rochas.

Os radioisótopos apresentam um núcleo atômico com excesso de prótons e quando transformados num isótopo com núcleo mais estável emitem partículas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ). No decaimento, o núcleo do isótopo libera raios gama ( $\gamma$ ) devido ao seu estado excitado transitando para o estado de equilíbrio energético.

As fontes de radiação gama detectadas pelo método gamaespectrométrico provêm dos radioisótopos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , onde  $^{40}\text{K}$  é responsável por 98% da emissão de raios gamas dos radioisótopos presentes na crosta terrestre (Adams e Gasparini 1970 *apud* Pires 1995). Os radioisótopos  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  não emitem raios gamas diretamente, entretanto, os seus radioisótopos filhos, respectivamente,  $^{208}\text{Tl}$  e  $^{214}\text{Bi}$ , emitem ao desintegrarem em  $^{208}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}$ . Por essa razão, as medidas das concentrações dos radioisótopos  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  são equivalentes.

A energia liberada durante a série de decaimento é representada por um espectro de linhas, onde cada radioelemento possui um espectro e um fotopico típico (Serafim, 2017). Os sistemas de aquisição contêm um espectrômetro de raios gama que registra uma faixa de energia entre 0 e 3 MeV (*Milhões de eletrovolts*) (IAEA, 2003). Dentro desse intervalo, as janelas energéticas são centradas no fotopico de maior intensidade do espectro do radioelemento. Para os radioelementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , as janelas são centradas em 1,460 MeV, 1,765 MeV e 2,614 MeV, respectivamente (IAEA, 2003) (Figura 1.6).



**Figura 1.6** - Espectro de raios gamas com os fotopicos de maior intensidade e as posições das janelas energéticas dos radioelementos potássio, urânio e tório e da contagem total. (Minty, 1997).

O levantamento aéreo gamaespectrométrico reflete as variações das concentrações dos



isótopos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  ( $^{214}\text{Bi}$ ) e  $^{232}\text{Th}$  ( $^{208}\text{Tl}$ ) na superfície terrestre. Uma síntese dos comportamentos geoquímicos dos elementos e os principais minerais portadores de cada elemento são apresentados a seguir.

*Potássio* - o potássio é o sétimo elemento mais comum e constitui cerca de 2,35% da crosta terrestre. O radioelemento  $^{40}\text{K}$  ocorre nas rochas félsicas, onde está contido nos silicatos ricos em potássio como feldspatos alcalinos (principalmente, ortoclásio e microclina) e micas (biotita e muscovita). Segundo Dickson e Scott (1997), quando a rocha é submetida ao intemperismo, os principais minerais hospedeiros de K são destruídos, na ordem biotita-K-feldspato-muscovita, e liberam potássio que pode ser adsorvido nos argilominerais como illita e montmorilonita. Nos processos hidrotermais, o radioelemento  $^{40}\text{K}$ , por ser bastante reativo e apresentar mobilidade geoquímica elevada, está sempre presente nas soluções hidrotermais (Ostrovskiy, 1975; Pires, 1995). As técnicas gamaespectrométricas permitem traçar esse comportamento geoquímico do potássio e definir se as concentrações geoquímicas nas rochas são resultantes dos processos intempéricos ou hidrotermais.

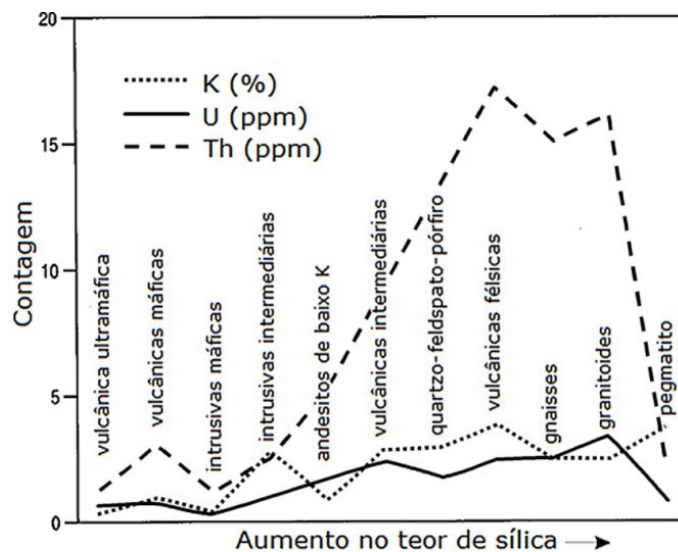
*Urânio* - o urânio constitui cerca de 3 ppm da crosta terrestre. Quando submetido a condições oxidantes (converte-se para o estado hexavalente  $\text{U}^{6+}$ ) é liberado de espécies minerais e complexa-se a ânions como  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  ou é retido em óxidos hidratados de ferro e argilominerais. Nas condições redutoras, o urânio apresenta baixa solubilidade (forma tetravalente  $\text{U}^{4+}$ ) e tende a ser imóvel (Dickson e Scott, 1997), concentrando-se nos ambientes redutores (Rogers e Adams, 1969b) em diferentes níveis de concentração. Por esse motivo, o urânio pode ser encontrado em óxidos, silicatos e carbonatos.

*Tório* - o tório constitui cerca de 12 ppm (partes por milhão) da crosta terrestre e ocorre principalmente nos minerais acessórios como monazita e zircão. Esse radioisótopo apresenta uma baixa mobilidade geoquímica (Dickson e Scott, 1997) o que permite usá-lo como traçador litológico.

Whitfield *et al.* (1959) descobriram que a concentração do tório aumenta mais do que a do urânio durante a diferenciação magmática e atribuem a separação à maior solubilidade do urânio em condições oxidantes. Por esse motivo, a razão Th/U pode ser usada para estudo do grau de diferenciação magmática (Dickson e Scott, 1997), no entanto, essa análise deve ser feita de forma cuidadosa, visto que as configurações geológicas são diversas e os corpos ígneos apresentam diferentes composições. Tilling e Gottfried (1969), por exemplo, apresentam granodioritos mais félsicos com quantidades menores de tório e urânio do que termos mais máficos.

Dickson e Scott (1997) mostram uma tendência de aumento no conteúdo de potássio,

tório e urânio para as rochas ígneas australianas com o incremento de sílica, onde as rochas ácidas apresentam um conteúdo maior de radioelementos quando comparadas com rochas básicas e ultrabásicas (Figura 1.7).



**Figura 1.7** - Variações de teores dos radioelementos potássio, urânio e tório para rochas ígneas com o incremento de sílica. (Dickson e Scott, 1997).

### ***Avaliação, Processamento e Interpretação dos Produtos Finais***

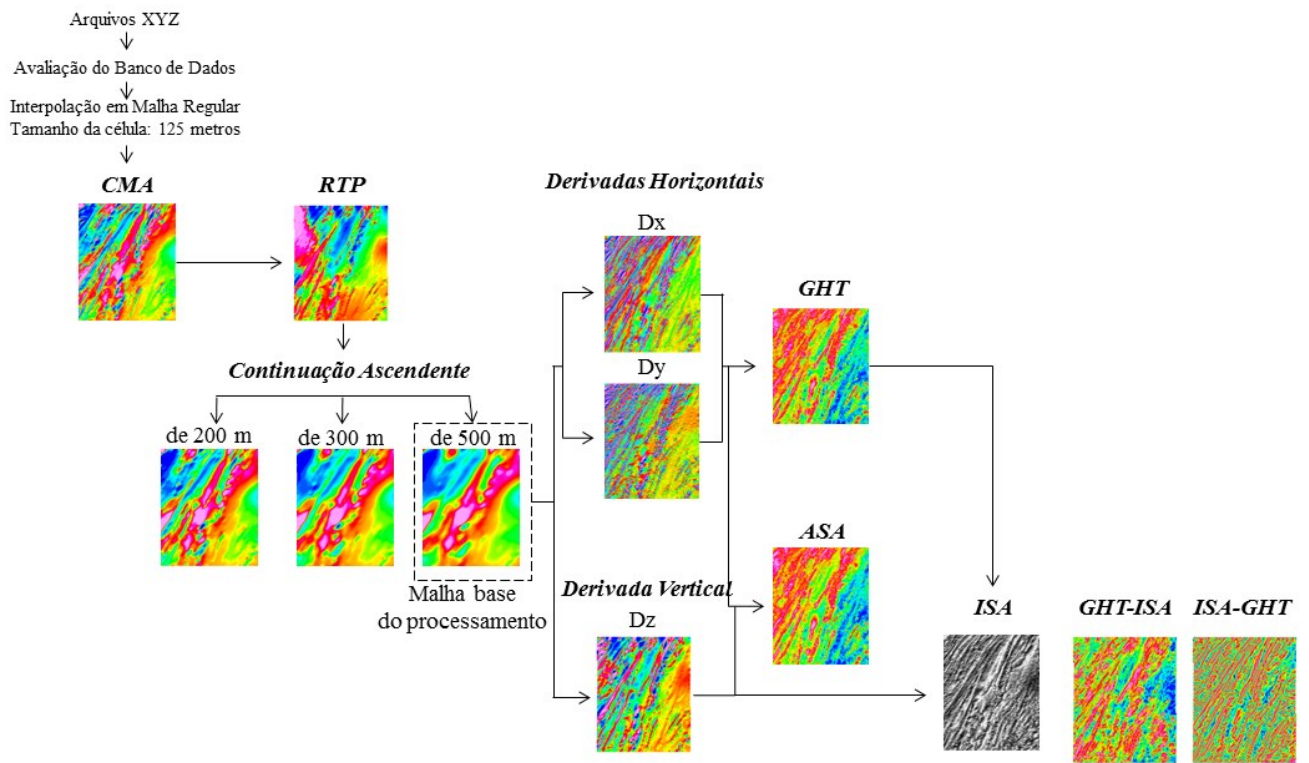
O pré-processamento dos dados brutos do Projeto Aerogeofísico Tocantins foi desenvolvido pela AGP-LA, em 2005 e 2006, no programa Oasis *Montaj* - versão 5.1.8 da GEOSOFT™, e avaliados pela CPRM.

Para a pesquisa foi realizada também uma avaliação do banco de dados do projeto no programa Oasis *Montaj* - Versão 8.3.3 da GEOSOFT™. No processamento foram aplicadas técnicas, que permitem interpretar os dados magnetométricos e gamaespectrométricos de forma adequada, ilustradas nos fluxogramas das Figuras 1.8 e 1.9, respectivamente.

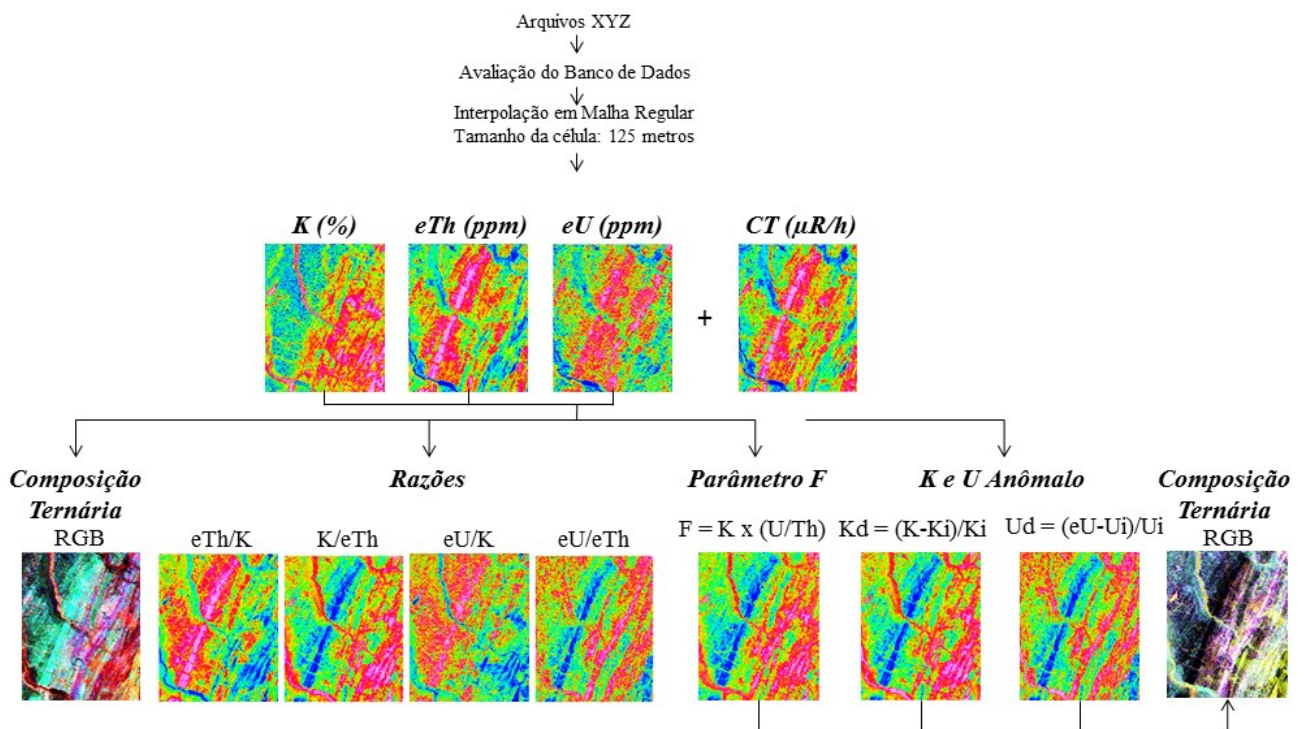
As imagens geofísicas geradas foram exportadas e analisadas em ambiente SIG (Sistema Informações Geográficas) no *software* ArcGIS versão 10.3 da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) onde foram confeccionados mapas geofísicos nas escalas 1:300.000 e 1:400.000.

#### ***1.4.2.3 Mapa de Potencialidade***

Para a elaboração do mapa de potencialidade foi aplicada a classificação não supervisionada, um método estatístico que usa algoritmos classificadores que consistem em agrupar intervalos, o ajuste de clusters (agrupamento) automaticamente, de classes dentro de um conjunto de dados. No processo de classificação utilizou-se o algoritmo ISODATA (*Self - Organizing Data Analysis techniques*) no *software* ENVI. Neste estudo, o algoritmo agrupou pixels automaticamente segundo o padrão de valores da legenda do Fator F.



**Figura 1.8** - Fluxograma das etapas do processamento de dados magnetométricos e os seus produtos finais.



**Figura 1.9** - Fluxograma das etapas do processamento de dados gamaespectrométricos e os seus produtos finais.

## II CONTEXTO GEOLÓGICO

### 1.1 Apresentação

As principais unidades litoestratigráficas da porção norte da Faixa Brasília foram afetadas ou desenvolvidas durante os eventos: colisionais (do Rhyacino ~ 2,0 Ga e Brasileiro ~ 0,9 a 0,6 Ga) e extensional (sistema de rifte estateriano ~1,78 Ga) ocorridos na margem oeste do Cráton São Francisco.

Ao final da seção é apresentada uma síntese, com base nas informações de campo e análises petrográficas, das unidades geológicas associadas ao ambiente mineralizador das ocorrências de granada da região de São Valério da Natividade.

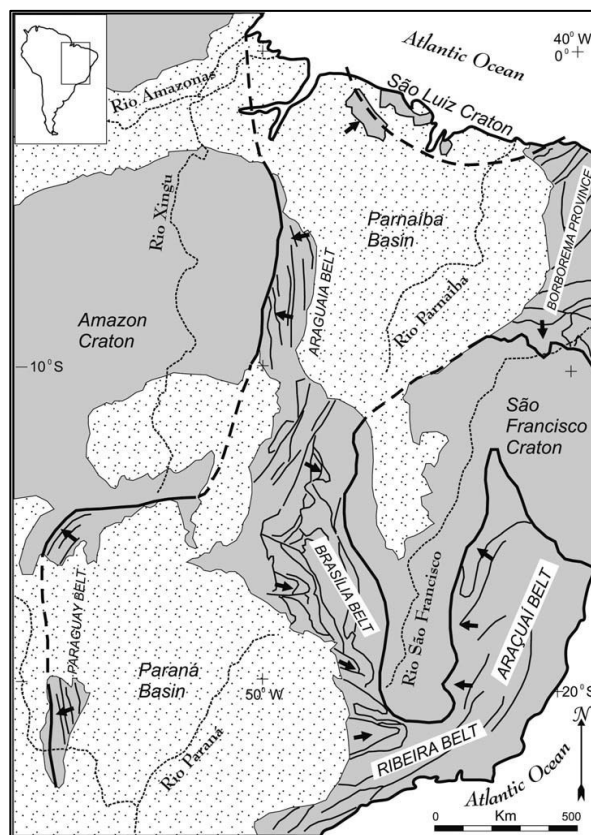
### 1.2 Geologia Regional

A área de estudo situa-se na porção NE da Província Estrutural do Tocantins (Almeida *et al.*, 1977) erigida no ciclo orogenético Brasileiro/Pan-Africano durante a convergência e colisão de três blocos continentais: o continente Amazônico a oeste, o continente São Francisco-Congo a leste e o bloco Paranapanema a sul (Fuck *et al.*, 2014). A amalgamação entre os blocos resultou na compartimentação geotectônica da província em faixas orogenéticas neoproterozoicas denominadas como faixas Araguaia e Paraguai, localizadas, respectivamente, nos limites leste e sul do Cráton Amazônico (CA) e a Faixa Brasília (FB), situada na borda oeste do Cráton São Francisco (CSF) (Figura 2.1).

A Faixa de Dobramentos Brasília (Almeida, 1967) é um dos mais completos orógenos com uma longa (900 a 600 Ma) e complexa história evolutiva (Pimentel, 2015) envolvendo eventos de acreção e retrabalhamento crustal. A unidade neoproterozoica estende-se por mais de 1000 km numa direção aproximadamente N-S ao longo da margem do Cráton São Francisco e exibe uma nítida vergência em direção à entidade cratônica (Fonseca *et al.*, 1995).

Dardenne (2000) estabeleceu uma evolução tectônica diacrônica ao longo da FB instituindo dois segmentos: um Setentrional, que contempla a área de estudo, e outro Meridional, de *trends* estruturais SSW-NNE e SSE-NNW, respectivamente, separados pela Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho, 1999 e 2000), uma estrutura de interferência WNW-ESE situada no paralelo 16°S com concavidade voltada para o CSF. De acordo com Uhlein *et al.* (2012), o segmento setentrional, configurado durante a colisão entre os crátons CA e CSF, apresenta uma estruturação composta por empurrões com vergência em direção ao CSF e feixes de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, integrantes do Lineamento Transbrasiliano (LTB)

(Schobbenhaus *et al.*, 1975), que secciona a Plataforma Sul-Americana e divide ao sul do Estado de Tocantins as faixas Araguaia e Brasília.

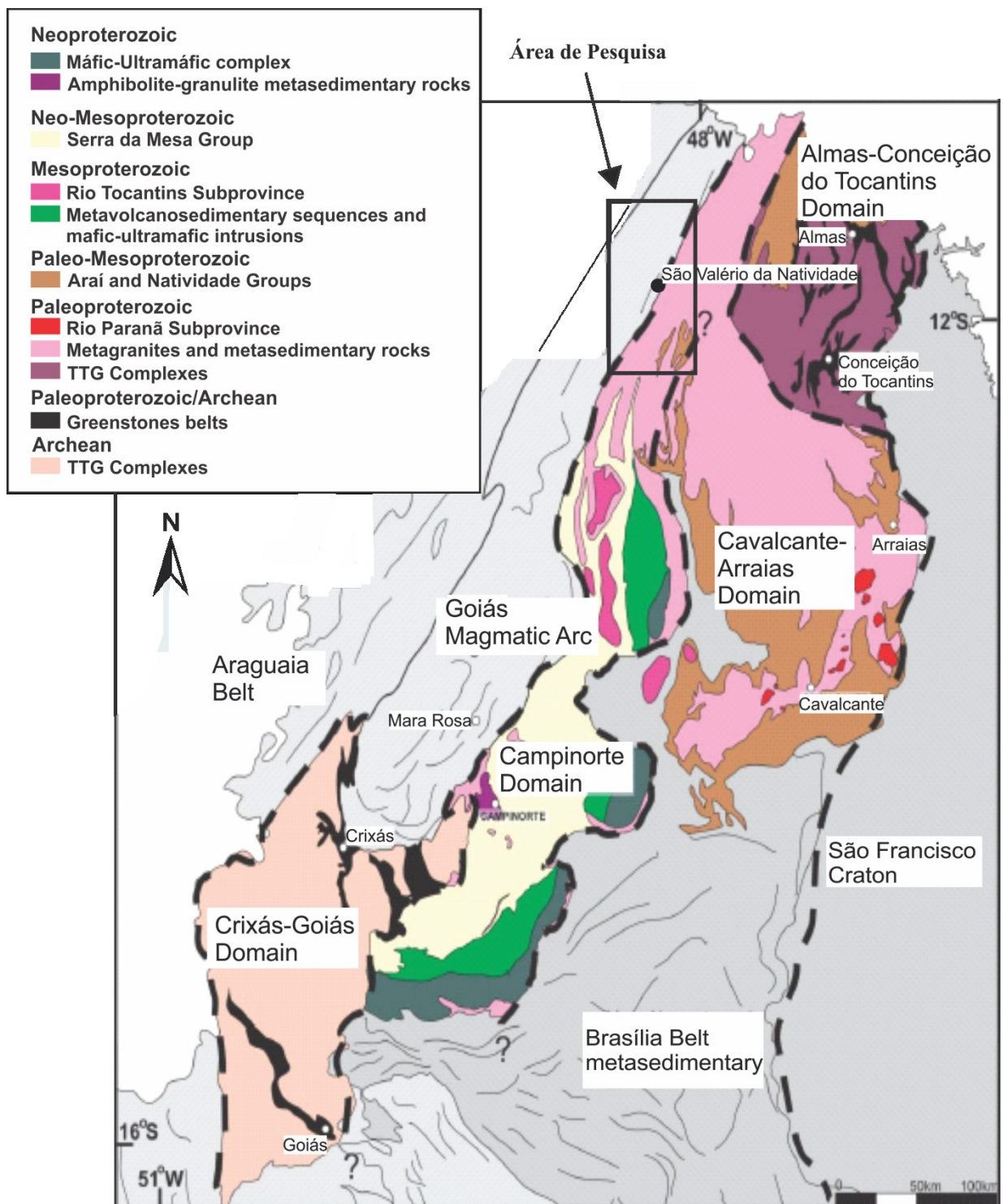


**Figura 2.1** - Mapa Geotectônico da Província Tocantins (Valeriano *et al.*, 2014).

Os estilos estruturais das porções oriental e ocidental da FB individualizam o cinturão móvel, na direção W-E, em domínios geotectônicos: Arco Magmático de Goiás (AMG), Maciço de Goiás (MG), Núcleo Metamórfico e o Cinturão de Dobras e Empurrões (Fuck *et al.*, 1994).

### 1.2.1 Unidades Litoestratigráficas

A descrição das unidades regionais da área de pesquisa foi feita com base em uma seção geológica traçada na direção NE-SW, partindo da sede do município de Natividade até o município de Peixe (vide localização na Figura 1.1), onde se observam as unidades litoestratigráficas: Grupo Natividade (com quartzitos, metassiltitos e metacalcários), domínio de gnaisses (da Suíte Aurumina) e AMG (com rochas vulcânicas básicas e metassedimentares). A Figura 2.2 apresenta a compartimentação do embasamento da porção setentrional da Faixa Brasília e a localização da área de pesquisa.



**Figura 2.2** - Compartimentação do embasamento da porção setentrional da Faixa Brasília no mapa modificado de Cordeiro (2014).

### 1.2.1.1 Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (Paleoproterozoico)

O bloco crustal Cavalcante-Natividade compreende o embasamento paleoproterozoico da porção norte da Faixa Brasília e representa um fragmento acrescionário à borda do cráton durante a orogenia paleoproterozoica ou a continuidade do Cráton São Francisco.

O bloco é dividido em dois domínios: (i) Almas-Conceição do Tocantins, representado

pelo Grupo Riachão do Ouro e a Suíte Almas-Dianópolis; e (ii) Cavalcante-Arraias, onde está inserida a área de pesquisa, representado por paragneisses e xistos da Formação Ticunzal (Marini *et al.*, 1978) e granitoides peraluminosos da Suíte Aurumina (Botelho *et al.*, 1999).

#### 1.2.1.1.1 Domínio Cavalcante-Arraias

O embasamento do Domínio Cavalcante-Arraias é representado por paragneisses e xistos da Formação Ticunzal e granitoides peraluminosos da Suíte Aurumina, de caráter sin-colisional (Cordeiro *et al.*, 2014), intrudidos na Formação Ticunzal.

A Formação Ticunzal corresponde a uma sequência metassedimentar formada da base para o topo, por paragneisses, eventualmente migmatizados e milonitizados, e xistos. A paragênese mineral dessas rochas registra um retrometamorfismo marcado pela presença de grafita de alta cristalinidade (Pimentel *et al.*, 2000) e quantidades variáveis de quartzo, clorita, muscovita e granada parcialmente preservada. Cuadros *et al.* (2017) associam a origem dos sedimentos da Formação Ticunzal (> 2,17 Ga) as rochas tonalíticas e granodioríticas do terreno Almas-Dianópolis e máficas-ultramáficas do Grupo Riachão do Ouro (2.4 Ga).

A sequência metassedimentar Ticunzal foi afetada por um volumoso magmatismo peraluminoso, denominado de Suíte Aurumina, com idade 2,12 a 2,17 Ga (Botelho *et al.*, 2006), exposto em uma grande área do Domínio Cavalcante-Arraias. Para Cuadros *et al.* (2017), esse magmatismo orogênico intruiu e provavelmente fundiu parcialmente a Formação Ticunzal.

A Suíte Aurumina é dividida em seis fácies (Au1, Au2, Au3, Au4, Au5, Au6) (Alvarenga *et al.*, 2007) que distinguem diferentes estágios de deformação. As Fácies Au1, Au2, Au3, Au4 e Au6 correspondem, respectivamente, a muscovita monzogranitos, muscovita-biotita monzogranitos, biotita tonalitos, biotita sienogranitos e turmalina leucogranitos com fácies locais pegmatíticas. A fácies Au5 constitui a poucos afloramentos de granitos migmatíticos.

#### 1.2.1.2 Maciço de Goiás

O Maciço de Goiás é composto por terrenos arqueanos-paleoproterozoicos (Jost *et al.*, 2013) cuja origem e relação com as orogenias Rhyaciana e Neoproterozoica ainda não estão claras. São discutidas na literatura geológica três hipóteses para a origem do Maciço de Goiás: (i) a entidade seria um microcontinente incorporado à borda oeste do CSF durante o Brasiliano (Pimentel *et al.*, 2000); (ii) a entidade seria um segmento da plataforma Franciscana encoberto por metassedimentares da Faixa Brasília (Soares *et al.*, 2006; Del Rey *et al.*, 2008; Fuck *et al.*, 2014); e (iii) a entidade seria um microcontinente incorporado, durante o evento Rhyaciano, à margem oeste do craton e submetido aos pulsos extensionais Paleo-Mesoproterozoico e orogenia Neoproterozoica (Martins-Ferreira, 2017).

O MG é composto por complexos TTG envolvidos por *greenstone belts* (Domínio Crixás-Goiás), sequência metavulcanossedimentar Campinorte associada à suíte ácida Pau de Mel (Domínio Campinorte) e complexos acamadados máficos-ultramáficos (Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto), característicos de ambiente de *rift* intracontinental (Dardenne, 2000), bordejados e separados por zonas de cisalhamento das sequências metavulcanossedimentares Juscelândia, Indaianópolis e Palmeirópolis compostas de unidades vulcânicas com assinatura toleítica.

Para Borges (2016), na região de São Valério da Natividade afloram rochas do Domínio Campinorte. Esse domínio corresponde a uma sequência metavulcanossedimentar, de idade 2,16 a 2,2 Ga (Giustina *et al.*, 2009), com pouca exposição em superfície. A sequência é definida por uma associação bastante deformada de rochas metassedimentares psamo-pelíticas (quartzitos, quartzo xistos, clorita-muscovita xistos, xistos carbonosos, xistos manganésíferos) e químicas (*metachert*, *gondito*) intercaladas geralmente por camadas lenticulares de metavulcânicas (metariolitos, metariodacitos, metadacitos) e subordinadas básicas (actinolitos, anfibólio xisto, talco-clorita xistos) (Alvarenga *et al.*, 2007).

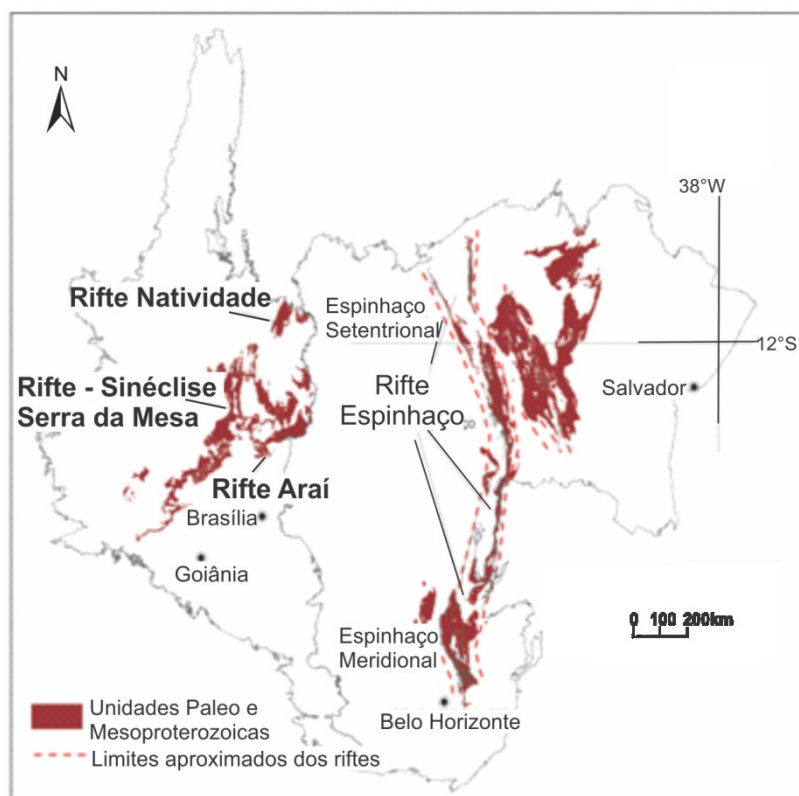
### **1.2.1.3 Sequências Metassedimentares Paleo-Mesoproterozoicas**

O embasamento norte da Faixa Brasília foi submetido a três eventos extensionais responsáveis pelo desenvolvimento de um sistema *rift* intracontinental, iniciado antes de 1,77 Ga (Tanizaki *et al.*, 2015), com manifestações magmáticas que proporcionaram a formação de bacias contemporâneas ao Supergrupo Espinhaço na Bahia (1,8 - 1,57 Ga) (Figura 2.3). A evolução do *rift* acomodou sequências sedimentares, depositadas em ambientes continentais e marinhos, representadas pelos grupos: Araí (Dyer, 1970) e Traíras (Martins-Ferreira, 2017), Serra da Mesa (Marini *et al.*, 1976 e 1977) e Natividade.

As sequências experimentaram eventos termotectônicos da orogenia Brasileira que imprimiram nas rochas um metamorfismo de baixo a médio grau e diferentes estilos de deformação. As variações faciológicas de cada grupo estão associadas à paleogeografia (Marques, 2010) do sistema *rift*.

Recentemente, o Grupo Araí foi reclassificado por Martins-Ferreira (2017), que propôs elevar a categoria de grupo a até então Formação Traíras descrita como fase pós-*rift* separada da Formação Arraias (estágio *rift*) por uma superfície discordante. A reclassificação foi feita com base nos estudos de proveniência de zircão detrítico da Formação Traíras que determinou uma idade de deposição máxima de  $1543 \pm 31$  Ma (Caliminiana) mais jovem que a idade do vulcanismo estateriano da Formação Arraias datado em  $1771 \pm 2$  Ma por Pimentel *et al.* (1991).





**Figura 2.3** - Sistemas de riftes implantados nas províncias São Francisco e Tocantins (Bizzi *et al.*, 2013 *apud* Marques 2010).

O Grupo Araí é composto por sequências metavulcanossedimentares pré-rift e sin-rift correspondentes as Formações Água Morna e Arraias, respectivamente, envolvidas em um metamorfismo na fácies xisto-verde e afetadas por um vulcanismo bimodal estateriano. A Formação Água Morna representa um pacote de sedimentos eólicos e fluviais de espessura pequena, composto por metarcóseos grossos e quartzitos feldspáticos e subordinadamente quartzitos micáceos e metaconglomerados intercalados entre os metarcóseos. A Formação Arraias representa uma sequência sedimentar continental espessa, subdividida nos membros Cubículo, Prata, Mutum, Ventura e Buracão que correspondem, respectivamente, a metaconglomerados matriz-suportados e subordinadamente metaconglomerados clastos-suportados, metarcóseos e quartzitos feldspáticos com lentes de metaconglomerados matriz-suportado e clastos-suportado, quartzitos puros, metaconglomerados e quartzitos com intercalações de metamarga e metagrauvaca, e derrames de basaltos, riolitos, riodacitos e dacitos, além de rochas piroclásticas e brechas (Tanizaki *et al.*, 2015).

O Grupo Traíras compreende uma sequência marinha depositada sobre o Grupo Araí ou diretamente sobre o embasamento composta por sedimentos plataformais registrados nas Formações Calda, Boqueirão, Rio Preto e Rosário (Martins-Ferreira, 2017). A Formação Caldas corresponde a uma sequência transicional com irregular continuidade lateral, subdividida em dois membros: inferior, composto por intercalações de quartzitos e metaconglomerados clastos-

suportado, subordinadamente ocorrem metagrauvas e metarcóseos e o superior, constituído por quartzitos puros intercalados por metapelitos. As formações Boqueirão, Rio Preto e Rosário representam sedimentos plataformais dominados por marés, caracterizados, respectivamente, por siltitos calcíferos interdigitados com quartzitos intercalados por material carbonoso, além de uma unidade superior composta por quartzitos e filitos com lentes de mármore, quartzitos puros bem selecionados e subordinadamente metaconglomerados e pelitos, sequência psamo-pelítica e sequência psamo-pelito-carbonatada.

O Grupo Serra da Mesa, proposto inicialmente como extensão norte do Grupo Araxá por Barbosa *et al.* (1969), corresponde a uma sequência marinha, pós-*rift*, composta por micaxistos e em menores proporções quartzitos e mármore, metamorfisada na fácies anfíbolito, intrudida na sua porção basal pela suíte alcalina do Peixe, datada em 1,5 Ga por Kitajima (2002), e empurrada para leste, sobrepondo-se tectonicamente aos pacotes metavulcanossedimentares Juscelândia, Indaianópolis e Palmeirópolis. O Grupo teve sua estratigrafia recentemente atualizada tendo sido incluído no Supergrupo Chapada dos Veadeiros (Martins-Ferreira *et al.*, 2017).

O Grupo Serra da Mesa é dividido em duas tectonosequências, unidade SM1 e unidade SM2, descritas por Marques (2010). A unidade SM1 apresenta na base muscovita-quartzitos sucedidos por xistos com lentes de calcixistos e mármore puros, e a SM2 consiste de quartzito sucedido por um espesso pacote de xistos com camadas calcissilicáticas e lentes de mármore impuros.

#### **1.2.1.4 Arco Magmático de Goiás**

O Arco Magmático de Goiás, denominado genericamente de Ortognaisse do Oeste de Goiás (Pimentel e Fuck, 1992), corresponde à unidade geotectônica composta por um conjunto de arcos justapostos eclodidos durante a subducção da crosta oceânica num evento pré-colisional e colididos durante a convergência entre os crátons São Francisco e Amazônico, registrando um longo período de tectônica convergente.

A crosta juvenil neoproterozoica está exposta nas porções norte e oeste do Estado de Goiás se estendendo para norte da Faixa Brasília até ser encoberta pela Bacia do Parnaíba. Essa extensa crosta juvenil é composta por faixas de sequências vulcanossedimentares intercaladas nas rochas tonalíticas-granodioríticas-graníticas.

O Arco Magmático de Goiás é separado em dois segmentos: meridional, denominado de Arco Arenópolis e setentrional, denominado de Arco Mara Rosa. A sequência vulcanossedimentar de Mara Rosa compreende várias faixas de direção estrutural NNE formadas por rochas metassedimentares (micaxistos, quartzitos e chert) com sedimentos derivados do próprio arco e metavulcânicas (metabasaltos a metariolitos). As faixas supracrustais são

intercaladas por metatonalitos e metadioritos e intrudidas por suítes tardi- à pós-orogênica.

### 1.3 Província Geomológica de São Valério da Natividade

A Província Gemológica de São Valério da Natividade, definida inicialmente por Frasca *et al.* (2006), é reconhecida pelas ocorrências de granada distribuídas ao longo de um *trend* associado a um domínio dúctil de direção N10-30°E.

O conjunto estratigráfico da província encontra-se deformado por cisalhamento de alto ângulo e afetado por uma granitogênese brasileira (U-Pb SHRIMP 557±15 Ma), nominada por Frasca *et al.* (2010) de Mata Azul, possivelmente, responsável pelos jazimentos de turmalina, berilo, granada e tantalita entre a região de São Valério da Natividade e Mata Azul.

O principal minério de São Valério da Natividade é a rodolita. Krambrock *et al.* (2013) descrevem porfiroblastos de granadas em lentes de xistos biotitizados ou quartzo-sericítico-feldspáticos e apontam para uma gênese associada a sedimentos aluminosos que foram metamorfizados em fácies anfíbolito. Em 2015, Hoover e colaboradores sugerem que o desenvolvimento dessas granadas esteja relacionado a processos hidrotermais.

Frasca *et al.* (2010) caracterizam as mineralizações da província por apófises, *stocks* e veios associados as fácies pegmatíticas e hidrotermais da intrusão brasileira Mata Azul, provavelmente, responsável pelos jazimentos de turmalina, berilo, granada, biotita e tantalita da província. Segundo os autores, a suíte aflora desde a região de Mata Azul para norte, onde é recoberta pelas rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba. A datação Sm-Nd em cristais de granada almandina extraídos do garimpo Schneider, próximo ao município de São Valério da Natividade, forneceu idades isocrônicas de 551,9 ± 4 Ma (Frasca *et al.*, 2010).

### 1.4 Geologia Local

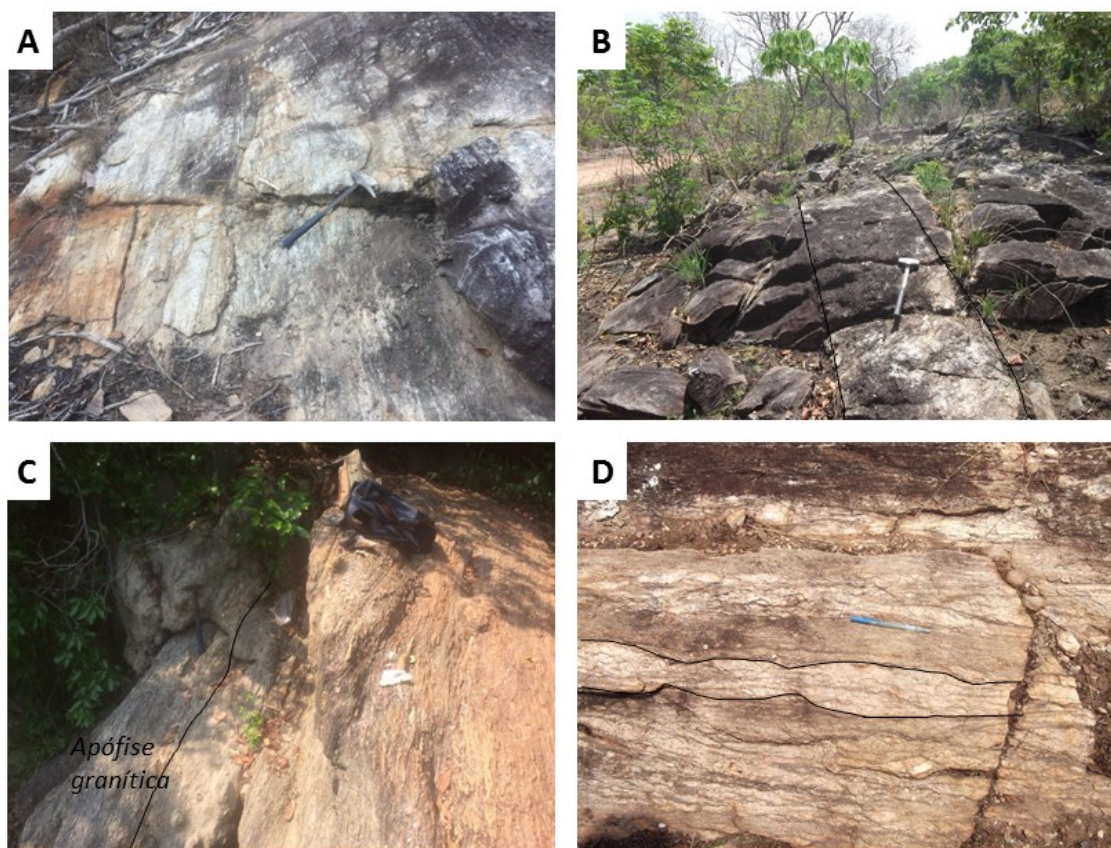
Para Frasca *et al.* (2010), a intrusão Mata Azul está encaixada concordantemente as estruturas das unidades do Domínio Cavalcante-Arraias. O limite entre o Domínio Cavalcante-Arraias e o Arco Magmático de Goiás foi interpretado como a zona de cisalhamento dextral, observada nos produtos aerogeofísicos, que separa o Grupo Traíras das demais unidades litológicas locais. As duas unidades litoestratigráficas apresentam padrões deformacionais distintos, o que coloca a suíte Mata Azul mapeada por Frasca na região limítrofe entre as unidades.

Na região de São Valério da Natividade são descritas três fácies da suíte Mata Azul (Frasca *et al.*, 2010): *Litofácies 1* – predominante, cartografado como corpo alongado, extenso, de direção NE-SW, composto por tonalitos a monzogranitos, aluminosos, com muscovita magmática; *Litofácies 2* - formada por rochas graníticas, subordinadamente sienogranitos a

biotita, hornblenda e granada sin a pós-cinemática; e *Litofácies 3* - correspondente a monzogranitos porfiroblásticos e porções hidrotermalizadas constituídas por corpos pegmatíticos e veios de quartzo alojados nas fácies anteriores ou próximos dos contatos.

Foi feito um reconhecimento geológico do *trend* de ocorrências de granada (vide Figura 1.2), onde foram observados metagranitoides xistificados compostos por muscovita ( $\pm$ biotita) e quartzo e biotita gnaisses, além de leucogranitos e pegmatitos. Aparentemente, as rochas leucograníticas e os termos pegmatíticos são representantes do sistema tardio a pós-brasiliano desenvolvido pela suíte Mata Azul nas unidades metagranitoides da área.

Os metagranitoides mostram uma direção geral milonítica N20°E e mergulhos subverticais (62-80°NW). Esses corpos são cortados por veios de quartzo de dimensões variáveis e corpos pegmatíticos com fenocristais de muscovita comumente não orientados indicando uma cristalização tardi a pós-cinemática. A Figura 2.4 apresenta fotografias de afloramentos de metagranitoides exibindo injeções graníticas e veios de quartzo estirados e boudinados.



**Figura 2.4** - Fotografias de afloramentos de rocha exibindo injeções graníticas e veios de quartzo boudinados e estirados. Em A, afloramento da rocha leucogranítica com fácies pegmatítica. Em B, afloramento de quartzo biotita muscovita xisto injetado por veios extensos de quartzo concordantes. Em C, apófise granítica sin-tectônica no muscovita- $\pm$ biotita-quarto xisto. Em D, veios de quartzo boudinados e estirados nos termos mais pegmatíticos.

A descrição petrográfica dos litotipos do ambiente mineralizador permitiu identificar um

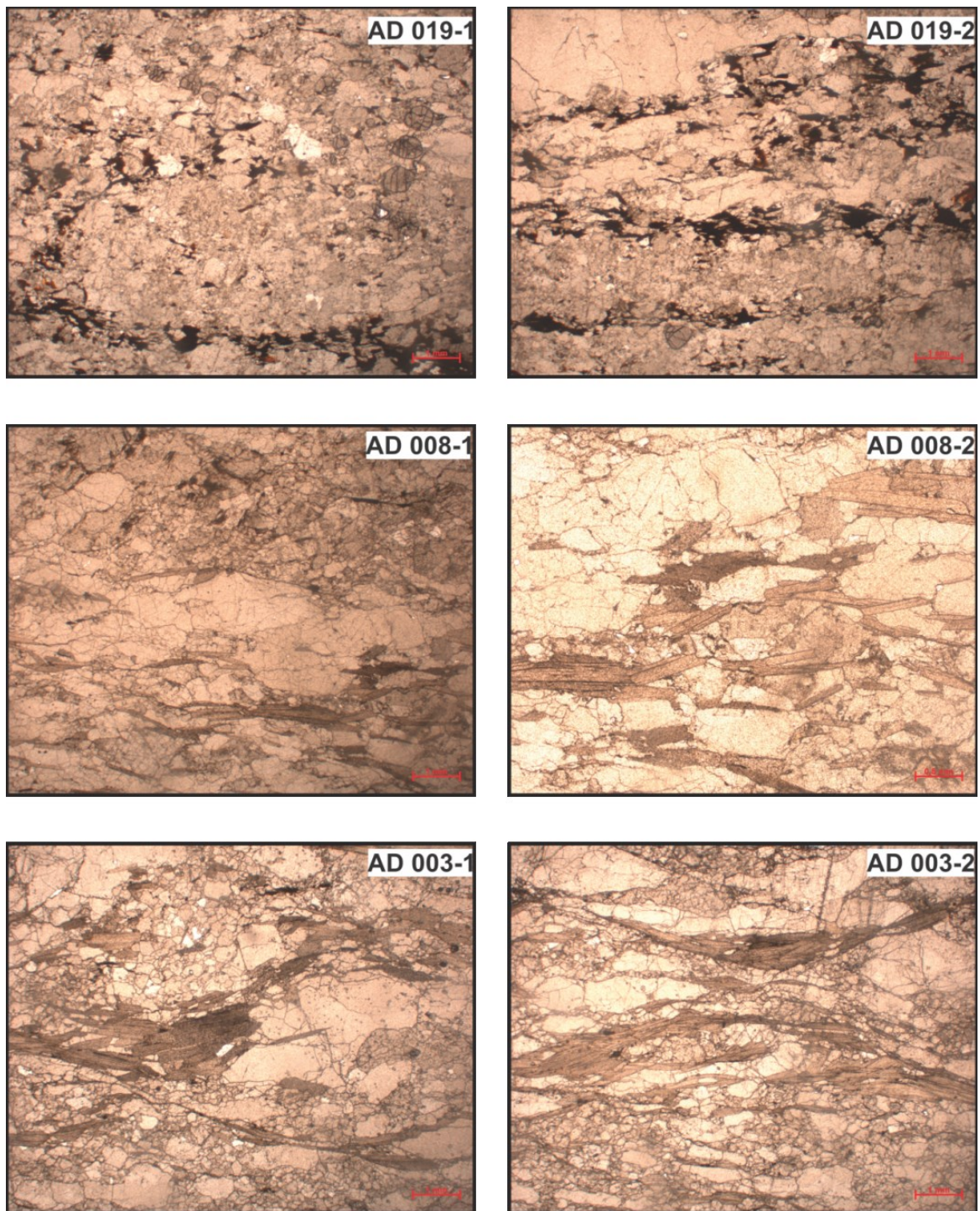
conjunto de rochas cujas relações são:

O *biotita-gnaiss* (**AD 019**) caracteriza-se por apresentar bandamento deformado composto por bandas máficas ricas em biotita e bandas félsicas quartzo-feldspáticas. Os cristais de granada ocorrem em menores proporções, disseminados nas bandas máficas. A análise petrográfica desse litotipo mostra quartzo estirado e biotita (Figura 2.5).

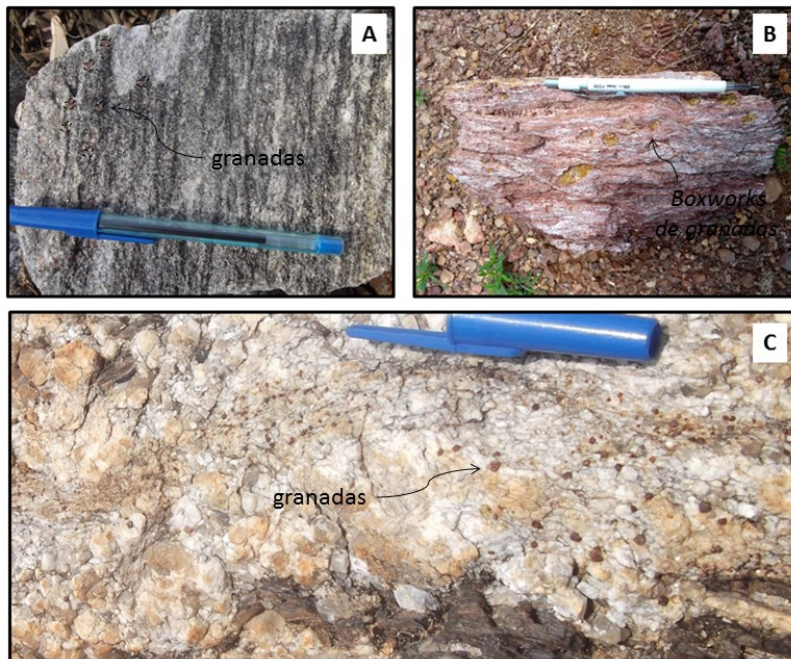
O *leucogranítico* (**AD 008**) é intrusiva nas unidades muscovíticas xistificadas e biotíticas gnaissificadas. A rocha apresenta termos sienograníticos com fenocristais de feldspato potássico de coloração rosada e granulação grossa, e termos pegmatíticos com fenocristais isolados de muscovita. A petrografia mostra estiramento de grãos de quartzo e feldspato, lamelas de biotita, plagioclásio e ortoclásio (Figura 2.5).

O *muscovita-±biotita-quartzo xisto* (**AD 003**) encontra-se fortemente cisalhada. A composição inicial da rocha foi em grande parte modificada por alteração hidrotermal incluindo silicificação e enriquecimento em muscovita. A análise petrográfica mostra fitas de megacristais de quartzo, plagioclásio, muscovita, microclina e pequena quantidade de granadas (Figura 2.5). O estudo infere um protólito granítico Tipo S, que, aparentemente, corresponde o tipo petrográfico mais antigo do ambiente mineralizador da granada.

Os três litotipos descritos não são mineralizados nas observações em afloramentos, no entanto, nas áreas de ocorrência, por exemplo, *AD019*, eventualmente, são encontradas granadas intemperizadas na superfície do terreno. Em rocha, os cristais de granadas são milimétricos a submilimétricos ocorrendo disseminados, acompanhando fenocristais de muscovita em fraturas extensivas ou alinhados segundo a foliação milonítica regional (Figura 2.6).

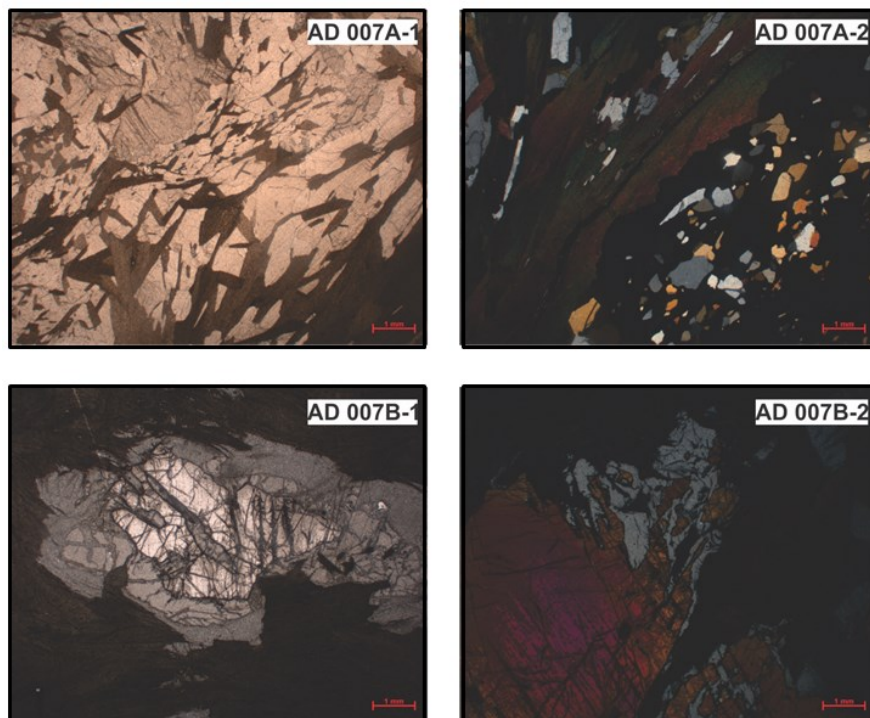


**Figura 2.5** - Fotomicrografias de lâminas delgadas dos litotipos observados em campo. Em AD 019 -1 e AD019-2, gnaiss bandado apresentando quartzo estirado e bandas máficas deformadas de biotita rica em Fe. Notar os grãos de granada arredondados e sutilmente orientados. Em AD 008-1 e AD008-2, gnaiss leucocrático protomilonítico composto por cristais de quartzo estirados, biotita rica em Fe e Ti, plagioclásio e ortoclásio. Em AD 003-1 e AD 003-2, granito paraderivado composto por fitas de quartzo estirado, muscovita, microclina e granadas disseminadas na foliação anastomosada.



**Figura 2.6** - Fotografias de fragmentos de rocha. Em A, cristais de granada disseminados em biotita gnaíse. Em B, boxworks de granada em biotita gnaíse intemperizado. E em C, granadas euédricas, milimétricas em fluxo nos termos mais pegmatíticos do leucogranito.

A rodolita concentra-se em lentes xistosas hidrotermalizadas com alteração potássica representada por biotita. A análise petrográfica do minério revela porfiroblastos de granada com inclusões de quartzo, estaurolita com coroa de reação cordierita (Figura 2.7, AD 007B) em uma matriz milonítica formada por clorita e restos de biotita (Figura 2.7, AD 007A).



**Figura 2.7** - Fotomicrografias de lâminas delgadas do minério.

Aparentemente, a mineralização se dá por processos hidrotermais em zonas de cisalhamento, mais especificamente em zonas de transtensão, as quais representam os locais para onde os fluidos migram e em associação a metamorfismo dinâmico geram as condições ideais para a formação dos depósitos de granada.

A avaliação da hipótese anteriormente enumerada pode ser testada pelos seguintes argumentos:

- Forte alinhamento das ocorrências de granada segundo as direções N20-30°E que coincidem com zonas de cisalhamento regionais;

- A paragênese mineral que acompanha as zonas mineralizadas é tipicamente de metamorfismo dinâmico, com textura poiquiloblástica definida pela inclusão de quartzo nos porfiroblastos de granada;

- O hidrotermalismo na zona mineralizada é corroborado pelas reações minerais comumente observadas como a transformação de biotita em clorita ou a ocorrência de cianita em textura diablástica;

- A associação da mineralização com enriquecimento de biotita (localmente, cloritizada) requer a entrada de potássio no sistema, que é atribuída aos processos hidrotermais;

- Feições do tipo rotação de cristais de granada, denunciadas por texturas tipo *snow ball*, estiramento de cristais de quartzo (*quartz ribbon*), sombras de pressão assimétricas e extinção ondulante/subgrãos em cristais de quartzo são indicadoras das condições dinâmicas em que as mineralizações se formaram.



# III PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

## 1.1 Apresentação

O conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi extraído do banco original do Projeto Aerogeofísico Tocantins. A etapa do pré-processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos foi realizada pela empresa AGP-LA (CPRM, 2006) em campo e complementada na sede da empresa, onde se aplicaram rotinas padrões próprias da AGP-LA. Essa etapa é realizada para que os erros grosseiros e incertezas dos levantamentos magnetométrico e gamaespectrométrico sejam removidos.

## 1.2 Pré-processamento

Essa etapa consiste em avaliar a qualidade dos dados aerogeofísicos. Todo o conjunto de dados magnetométricos e gamaespectrométricos foi analisado e verificado os parâmetros de aquisição, a distribuição espacial das linhas levantadas e a presença de dados inconsistentes (espúrios). Uma única linha de produção (L22851) apresentou desvio direcional e para garantir a qualidade do processamento foi eliminado apenas o ponto que apontava erros de coordenadas.

Para os dados magnéticos foram aplicados os métodos de consistência da Quarta Diferença e Parâmetro P. O método da Quarta Diferença consiste em substituir o valor de um fiducial da linha de produção pela diferença entre o segundo fiducial anterior e o segundo fiducial posterior. O método realiza esse procedimento 4 vezes.

O método parâmetro P é uma normalização logarítmica que leva em consideração que 99,7% dos dados estão em torno de uma média entre -3 e 3 vezes o desvio padrão. O parâmetro P é calculado pela Equação 3.1.

$$P = \log_{10} [(x - \bar{x}) - (3 * \sigma)] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde,  $\bar{x}$  é a média aritmética das medidas do campo magnético reduzido do IGRF e  $\sigma$  é o desvio padrão.

Os valores que apresentam três vezes o desvio padrão são realçados (picos) nos perfis e são analisados de forma a apurar se é um ruído ou uma anomalia. Foram observadas anomalias de alta frequência que foram mantidas por apresentarem outros valores nas vizinhanças.

Os dados dos canais de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) foram analisados estatisticamente de modo a verificar a presença de valores negativos que podem ocorrer devido a erros e

incertezas dos aerolevantamentos. A correção foi feita através da adição de constantes aos valores negativos de modo a torná-los mais próximos de zero (Ferreira *et al.*, 2009 *apud* Weihermann *et al.*, 2016). Nesta pesquisa, para que os valores nulos não comprometessem os cálculos das razões, os valores mínimos do K, eTh e eU foram convertidos para 0.01.

### 1.3 Processamento

Após avaliação da qualidade dos dados iniciou-se o processamento que consiste em distribuir os dados em uma malha regular através de algoritmos de interpolação e transformá-los em imagens representativas dos dados aerogeofísicos.

#### *Célula Unitária –*

Para o tamanho da célula unitária da malha, Vasconcelos *et al.* (1994) sugerem valores entre 1/4 e 1/8 do espaçamento entre as linhas de voo. Esse processo denominado de falseamento ou *aliasing* permite a incorporação de anomalias de comprimento de onda menor que duas vezes o espaçamento entre observações consecutivas que não podem ser detectadas, o que reduz falsas anomalias. Os dados do trabalho foram interpolados com um tamanho de célula de 125 metros considerando o espaçamento entre as linhas de voo de 500 metros do Projeto Aerogeofísico Tocantins.

#### *Algoritmos de Interpolação*

Foram utilizados os algoritmos bi-direcional e curvatura mínima para os dados magnetométricos e gamaespectrométricos, respectivamente. O interpolador obedece ao teorema de amostragem ou Teorema de Shannon que consiste em procurar fiduciais localizados em uma distância duas vezes maior que o espaçamento entre os nós (Blum, 1999).

A interpolação bi-direcional acontece em duas etapas: os fiduciais de cada linha de voo são interpolados ao longo da linha original do levantamento e depois a interpolação é feita perpendicularmente à linha de voo criando os nós. O algoritmo curvatura mínima ajusta repetidamente os valores dos nós aos dados mais próximos até obter uma superfície de menor curvatura. A cada ajuste, o tamanho da célula é dividido por 2 estabelecendo uma nova superfície que é usada para a interação seguinte.

#### 1.3.1 Dados Magnetométricos

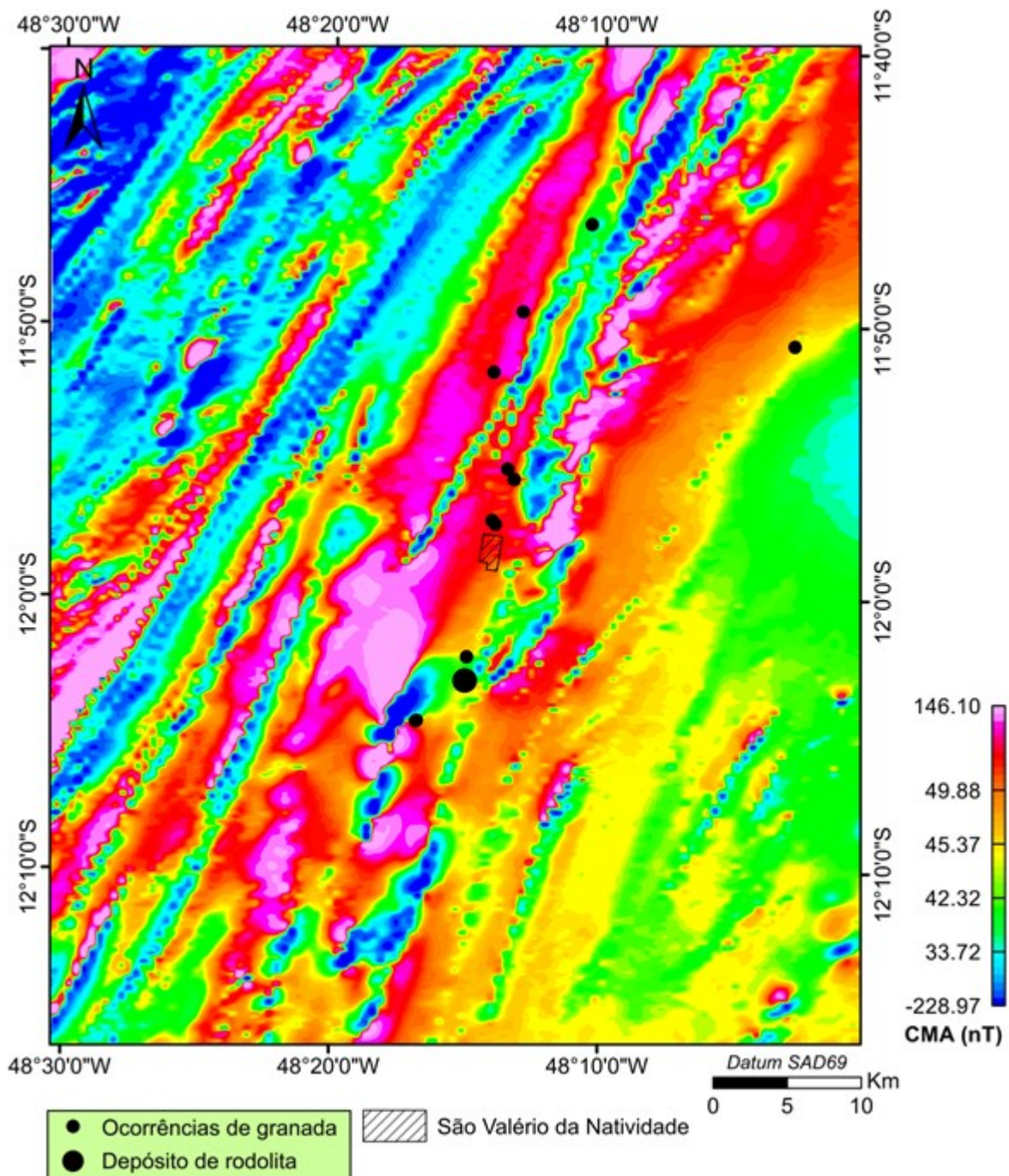
O campo magnético anômalo obtido através da subtração do campo magnético total do IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) foi utilizado para o processamento de dados e de seus produtos subsequentes.

O processamento dos dados magnéticos conta com o emprego de operadores matemáticos

que aprimoram e permitem uma melhor interpretação dos dados. A aplicação desses filtros é feita no grid Campo Magnético Anômalo ou Campo Magnético Reduzido ao Polo.

### ***Campo Magnético Anômalo (CMA)***

O Campo Magnético Anômalo (Figura 3.1) representa as anomalias magnéticas na crosta acima da superfície de *Curie*. Esse campo é obtido através da redução do modelo internacional IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) que retira a influência do campo proveniente do núcleo terrestre do campo magnético total medido.



**Figura 3.1** - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo.

### ***Redução ao Polo (RTP)***

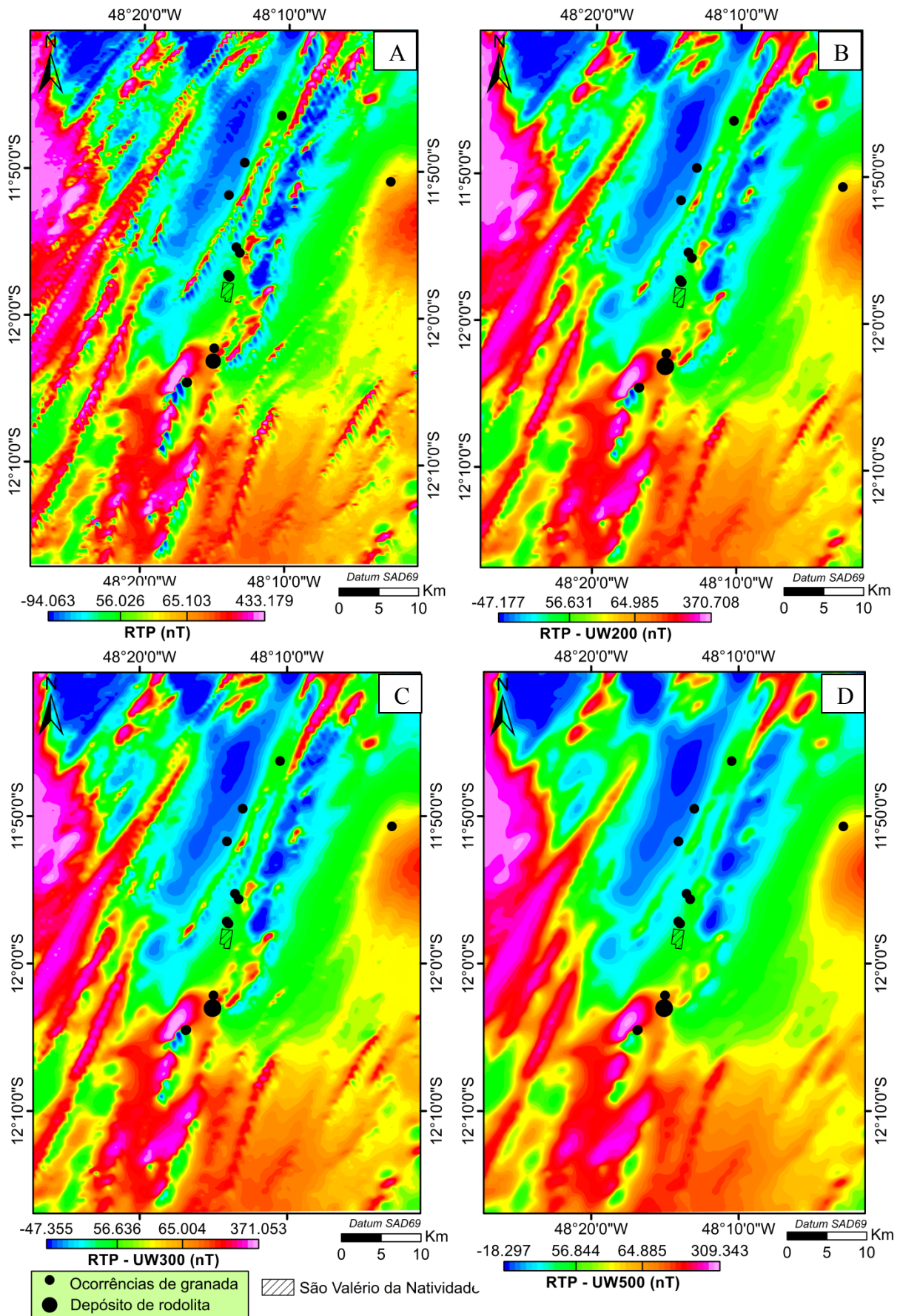
O filtro transforma a anomalia de caráter dipolar em uma anomalia monopolar, centralizando as máximas amplitudes sobre o centro das fontes causadoras, ou seja, converte o campo magnético de uma latitude magnética qualquer para o campo no pólo magnético (Milligan e Gunn, 1997).

A aplicação da redução ao polo (Cooper e Cowan, 2005) exige conhecer a inclinação e declinação magnética da época do aerolevanteamento do vetor de magnetização das fontes. A data média do aerolevanteamento do Projeto Tocantins é 15/10/2005 (CPRM, 2006) e o ângulo de inclinação e declinação magnética foi de  $-16.27^\circ$  e  $-20.29^\circ$ , respectivamente.

A interpretação da imagem do campo reduzido ao polo deve ser cuidadosa, pois para fontes geológicas em baixas latitudes magnéticas, como boa parte do sul de Tocantins, a aplicação do filtro pode ser instável (Li, 2008) e mostrar feições lineares espúrias paralelas à declinação magnética. Como a área de pesquisa é bastante reduzida, o resultado da aplicação do filtro redução ao polo mostrou-se adequada e satisfatória. A imagem gerada após a aplicação da técnica é apresentada na Figura 3.2-A.

### ***Continuação Ascendente (UW)***

A técnica Continuação Ascendente permite simular alturas de voo maiores que a altura original do aerolevanteamento. Esse procedimento atenua os ruídos (de alta frequência), como os observados nos mapas CMA e RTP. A partir do produto CMA-RTP (Figura 3.2-A) realizou-se uma continuação ascendente de 200, 300 e 500 metros (Figura 3.2-B, C e D, respectivamente), considerando a altura média do voo de 100 metros. A continuação de voo de 500 metros foi satisfatória, pois atenuou os ruídos sem perder a informação geológica, portanto, CMA-RTP-UW500m foi utilizado para os processamentos subsequentes.



**Figura 3.2** - Mapa do campo magnético reduzido ao polo (CMA-RTP) da área de trabalho (A) e CMA-RTP com continuação ascendente (UW) de 200 (B), 300 (C) e 500 metros (D).

### ***Primeiras Derivadas Horizontais (Dx e Dy) e Vertical (Dz)***

Trata-se de filtros passa-alta que amplificam as informações mais superficiais ressaltando as bordas de corpos anômalos. As primeiras derivadas horizontais e vertical são calculadas com as Equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$Dx = \frac{\partial m}{\partial x} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$Dy = \frac{\partial m}{\partial y} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$Dz = \frac{\partial m}{\partial z} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde,  $m$  é a anomalia magnética e  $\partial x$ ,  $\partial y$  e  $\partial z$  correspondem às derivadas segundo as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. As Figuras 3.3 e 3.4 exibem os mapas das derivadas horizontais do campo magnético anômalo reduzido ao polo com continuação ascendente de 500 metros.

A Figura 3.5 apresenta o painel com os mapas da derivada vertical do campo magnético anômalo reduzido ao polo com continuação ascendente de 200, 300 e 500 metros, que mostra a atenuação do sinal com o incremento da continuação ascendente.

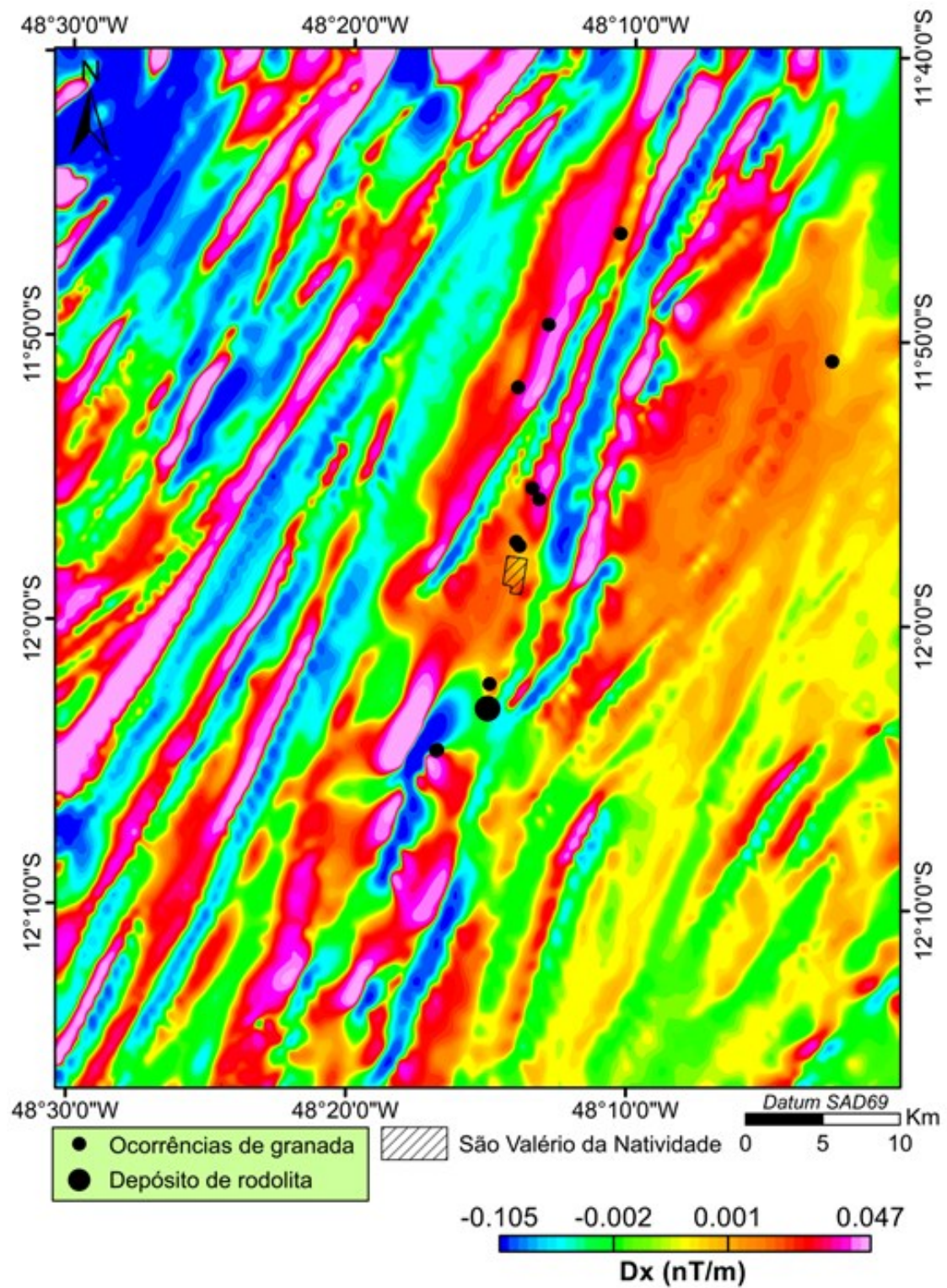
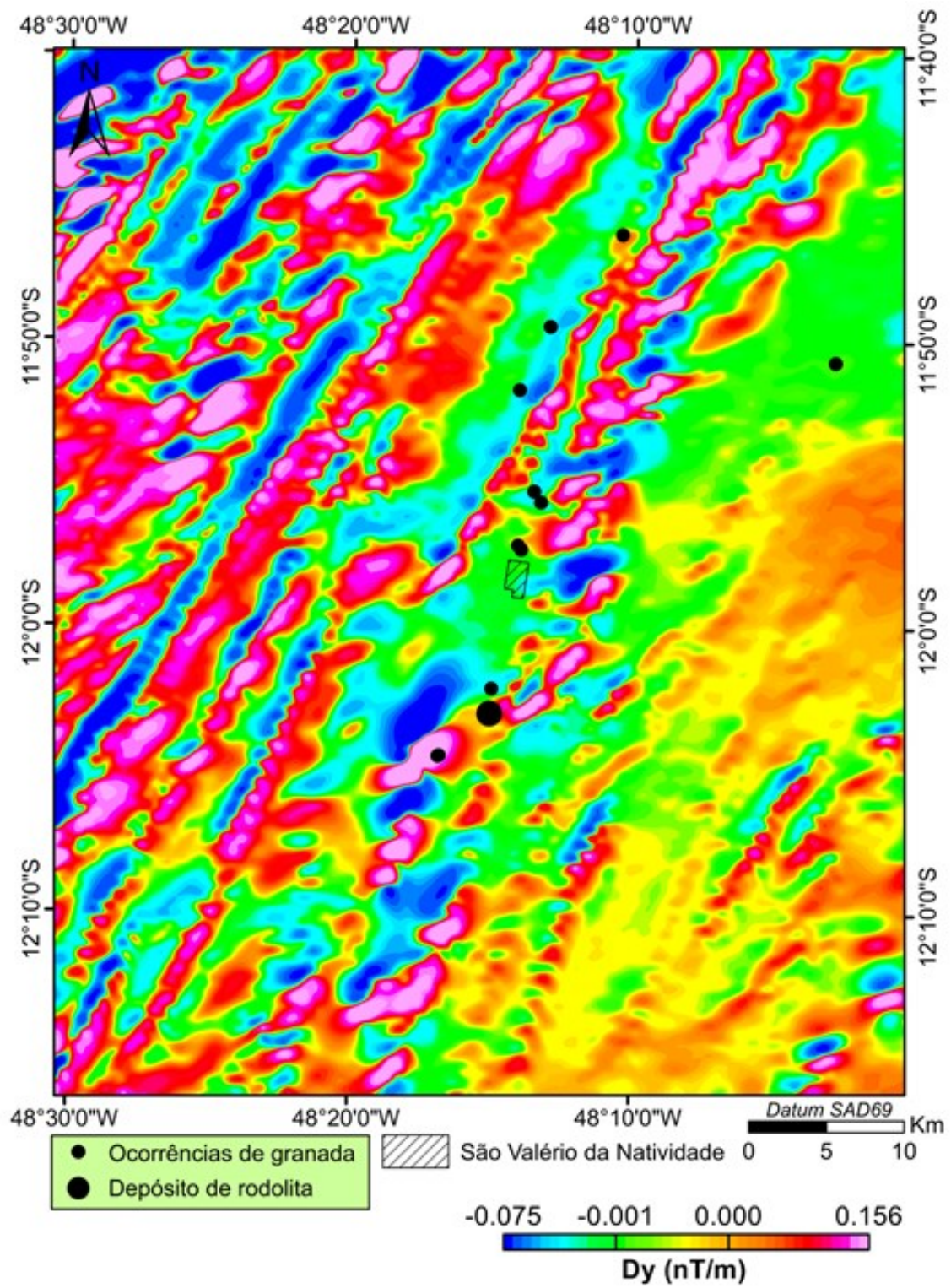
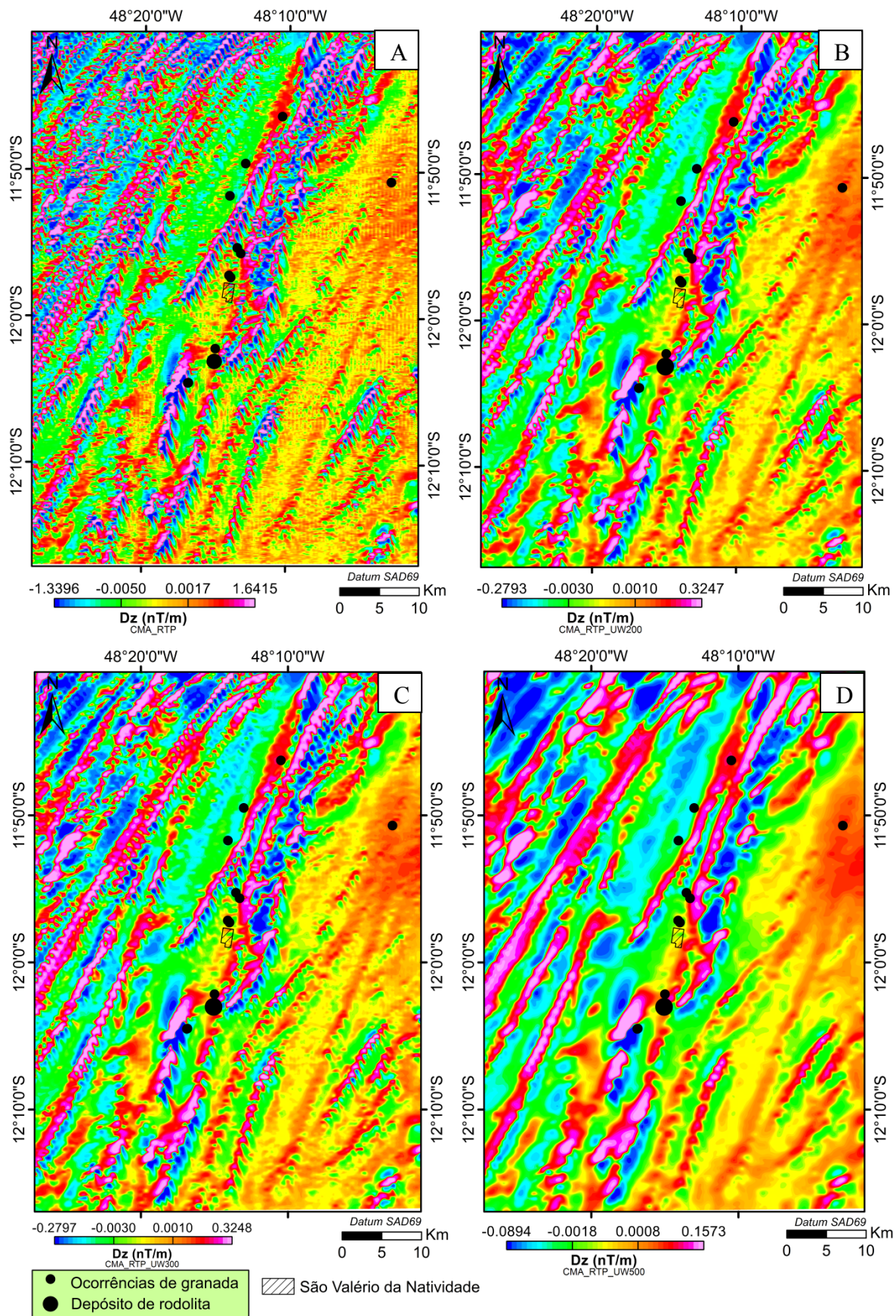


Figura 3.3 - Mapa da derivada horizontal ( $D_x$ ) do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.



*Figura 3.4 - Mapa da derivada horizontal ( $D_y$ ) do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.*





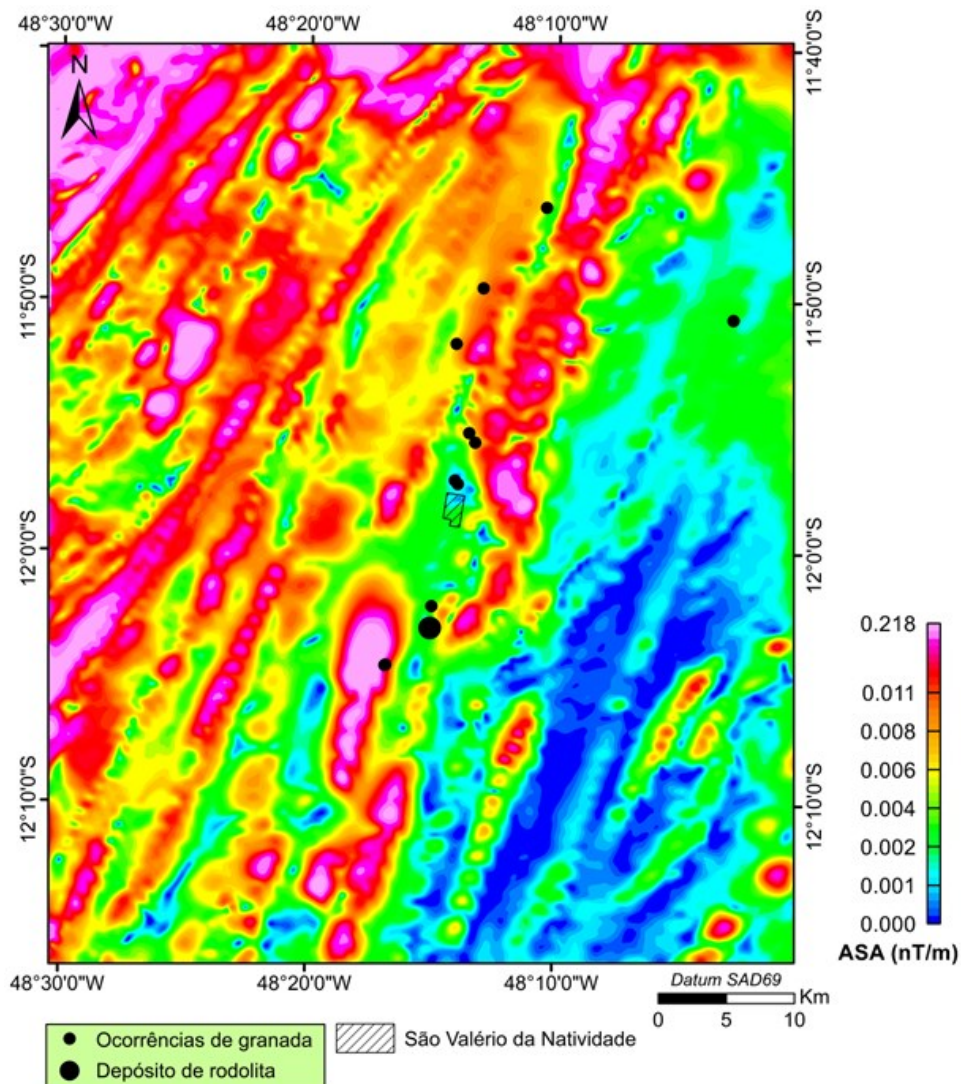
**Figura 3.5** - Mapa da derivada vertical ( $Dz$ ) do campo magnético anômalo reduzido ao polo (A) e com continuação ascendente de 200 (B), 300 (C) e 500 metros (D) da área de estudo.

### ***Amplitude do Sinal Analítico (ASA)***

A técnica amplitude do sinal analítico (Nabighian, 1972) é baseada na combinação das derivadas horizontais e vertical. O filtro é indicado para a localização de feições geológicas e estruturais rasas, pois realça a geometria, onde os picos do ASA ocorrem diretamente na bordas dos corpos anômalos. A função é dependente da profundidade da anomalia, cujas amplitudes diminuem com o aumento de profundidade da fonte (Li, 2006). A função é dependente da direção da magnetização da fonte e do campo magnético terrestre. A amplitude do sinal analítico é calculada a partir da Equação 3.5.

$$|A(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial z}\right)^2} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde,  $\frac{\partial m}{\partial x}$  e  $\frac{\partial m}{\partial y}$  são as derivadas horizontais, respectivamente, em x e em y e  $\frac{\partial m}{\partial z}$  é a derivada vertical em z. A imagem do ASA é apresentado na Figura 3.6.



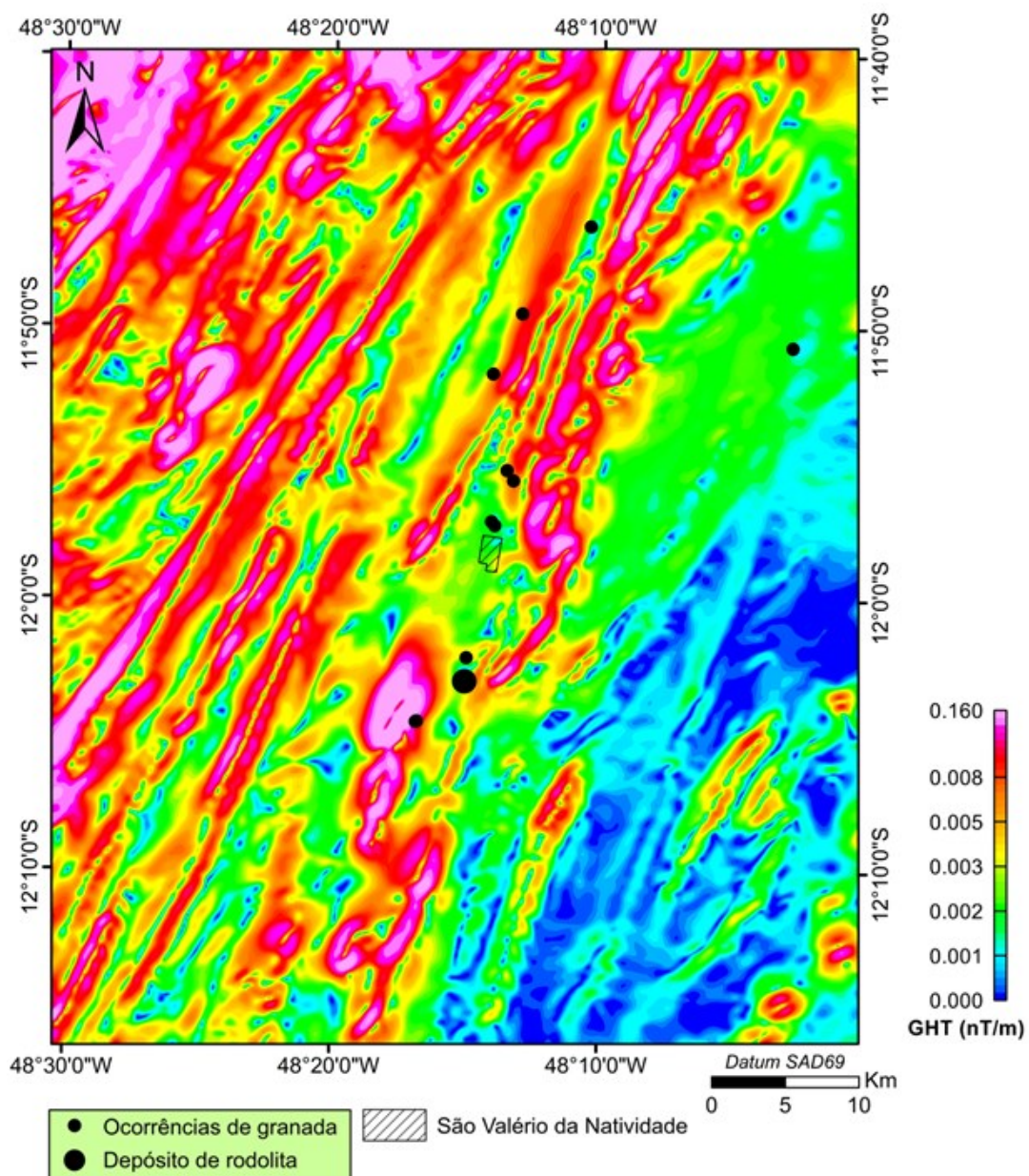
**Figura 3.6** - Mapa da amplitude do sinal analítico do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.

### **Gradiente Horizontal Total (GHT)**

O Gradiente Horizontal Total (Cordell e Grauch, 1985) expressa à raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas horizontais e permite ressaltar as mudanças de susceptibilidade magnética definindo melhor as bordas dos corpos e estruturas magnéticas lineares. O GHT é calculado com a Equação 3.6.

$$\text{GHT} = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde,  $\frac{\partial m}{\partial x}$  e  $\frac{\partial m}{\partial y}$  são as derivadas horizontais nas direções x e y, respectivamente. A Figura 3.7 apresenta o mapa da imagem do GHT.



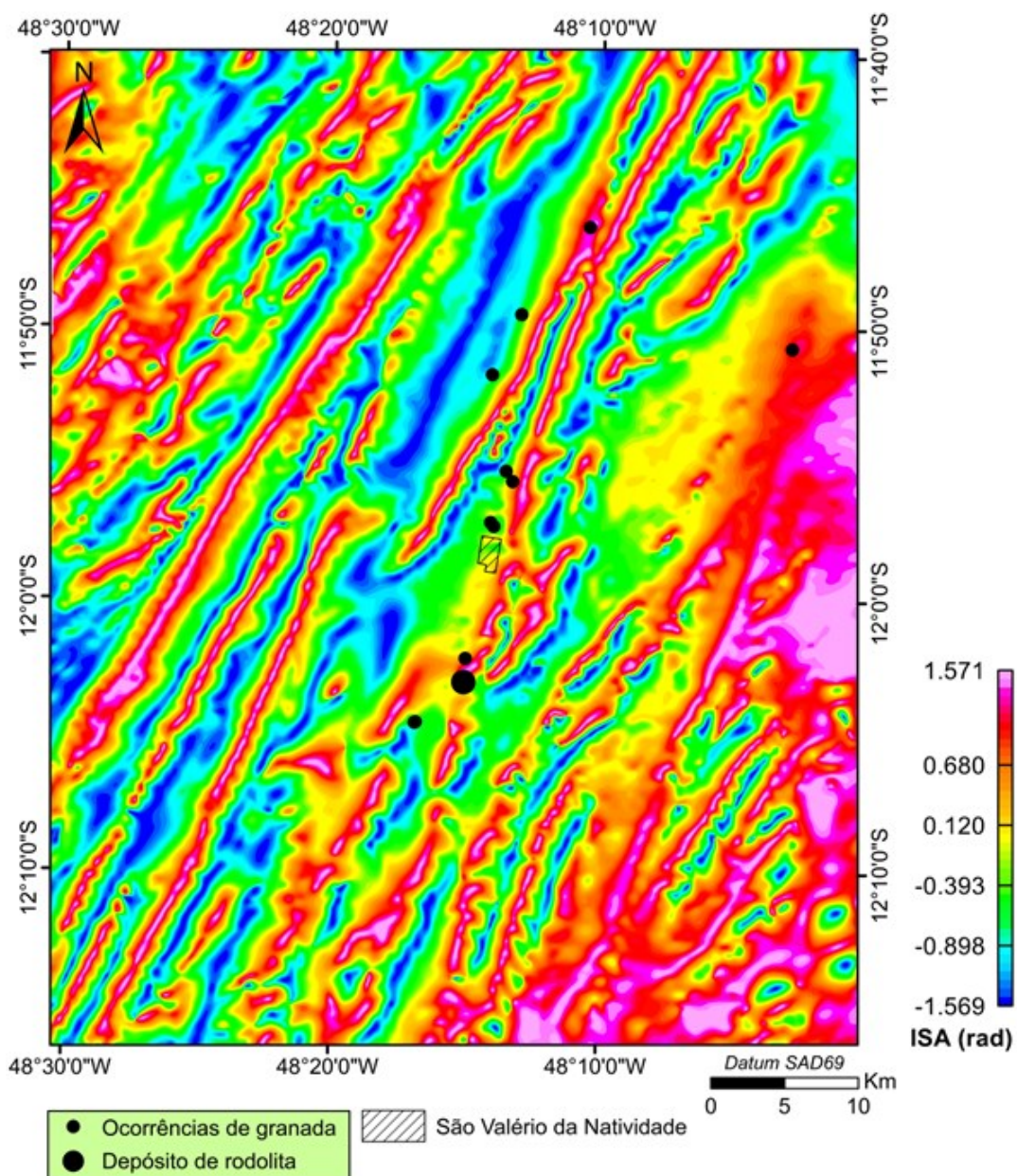
**Figura 3.7** - Mapa do gradiente horizontal total do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.

### ***Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou Tilt Derivate (TDR)***

O ISA (Miller e Singh, 1994) representa o ângulo formado entre o vetor imaginário (Gz) e real (GHT). A técnica quando aplicada equaliza as amplitudes e realça os centros dos corpos anômalos. A ISA é calculada com a Equação 3.7.

$$ISA = \arctan \sqrt{\left( \frac{\frac{\partial m}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2}} \right)} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

onde  $\frac{\partial m}{\partial z}$  é a derivada vertical em z e  $\sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)^2}$  gradiente horizontal total. A Figura 3.8 apresenta o mapa da imagem ISA.



**Figura 3.8** - Mapa da inclinação do sinal analítico do campo magnético reduzido ao polo da área de estudo.

### ***Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA)***

A técnica introduzida por Verduzco *et al.* (2004) consiste em aplicar o gradiente horizontal total (GHT) aos dados do ISA. O método permite centralizar as amplitudes máximas sobre os limites dos corpos anômalos, embora, as amplitudes são atenuadas em função da profundidade (Ferreira *et al.*, 2010 e 2013). O método é sensível a ruídos e é ideal para mapear feições estruturais rasas como apresentado por Verduzco *et al.* (2004).

O GHT-ISA é calculado com a Equação 3.8.

$$GHT - ISA = \left[ \left( \frac{\partial ISA}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial ISA}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde,  $\partial ISA$  é a derivada da inclinação do sinal analítico,  $\partial x$  e  $\partial y$  são as derivadas horizontais em x e y, respectivamente.

### ***Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT)***

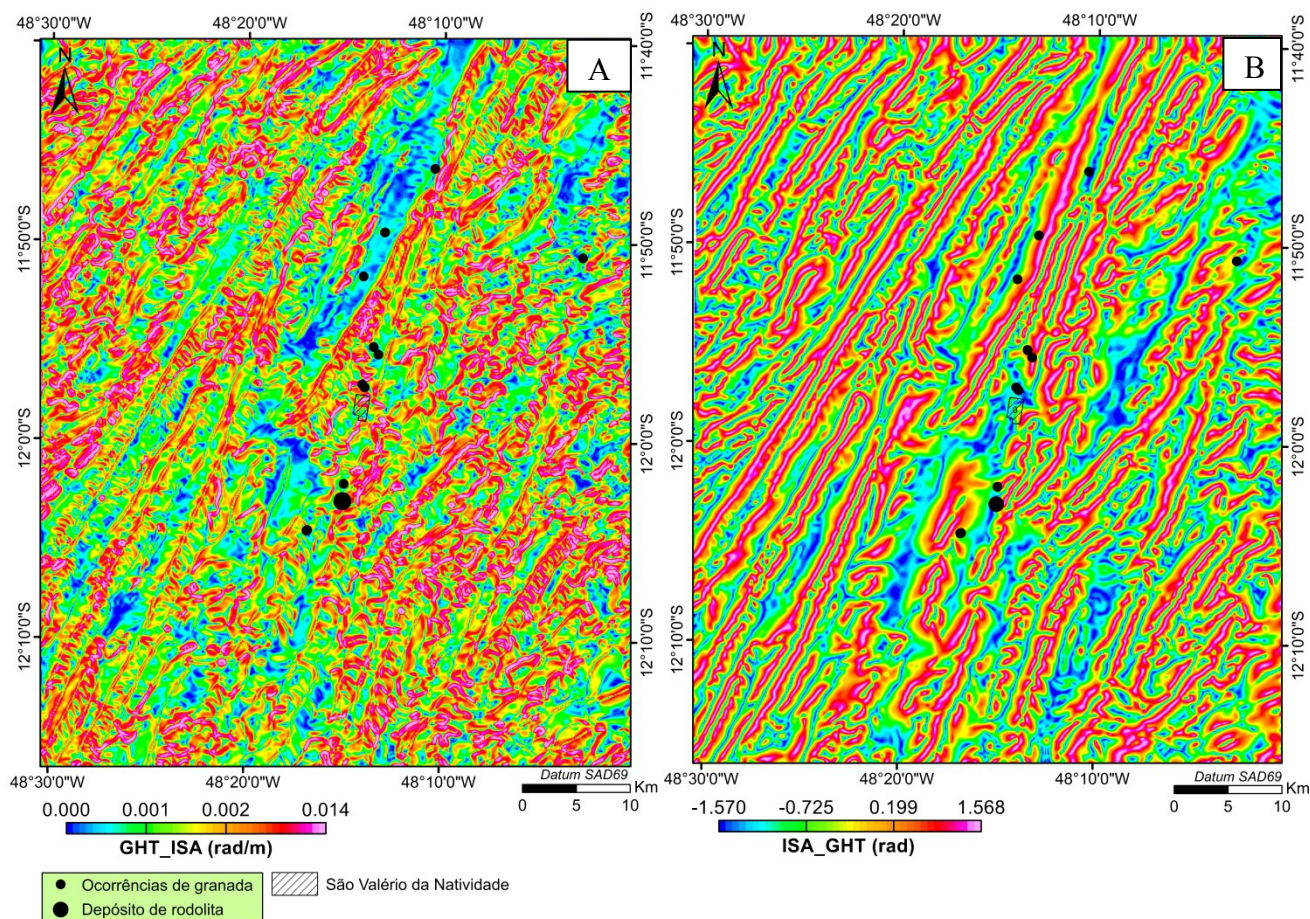
O método desenvolvido por Ferreira *et al.* (2010) é eficaz para detecção de borda de corpos magnéticos (Ferreira *et al.*, 2013) quando aplicado a dados magnéticos reduzidos ao polo. A técnica permite realçar o GHT utilizando o filtro ISA que equaliza as amplitudes sem guardar relação com a profundidade, portanto ideal para definição do arcabouço magnético estrutural.

O ISA-GHT é calculado com a Equação 3.9.

$$ISA-GHT = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial GHT}{\partial z}}{\sqrt{\left( \frac{\partial GHT}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial GHT}{\partial y} \right)^2}} \right) \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde,  $\partial GHT$  é a derivada do gradiente horizontal total,  $\partial x$  e  $\partial y$  são as derivadas horizontais em x e y, respectivamente.

A Figura 3.9 apresenta os mapas do GHT-ISA e ISA-GHT.



**Figura 3.9-** Os mapas do Gradiente Horizontal total da Inclinação do Sinal Analítico (GHT-ISA)(A) e da Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT) (B) da área de estudo.

### 1.3.2 Dados Gamaespectrométricos

Após a análise estatística dos dados gamaespectrométricos e remoção dos valores negativos foram criados novos canais para as variáveis básicas (potássio percentual, equivalente tório e equivalente urânio) que embasaram o processamento subsequente.

Os dados dos canais de contagem total, potássio, tório e urânio foram interpolados e transformados em imagens.

#### **Contagem Total ( $\mu R/h$ )**

Os dados do canal de contagem total são expressos em taxas de exposição microRöntgen por hora ( $\mu R/h$ ). A imagem contagem total é apresentada na Figura 3.10.

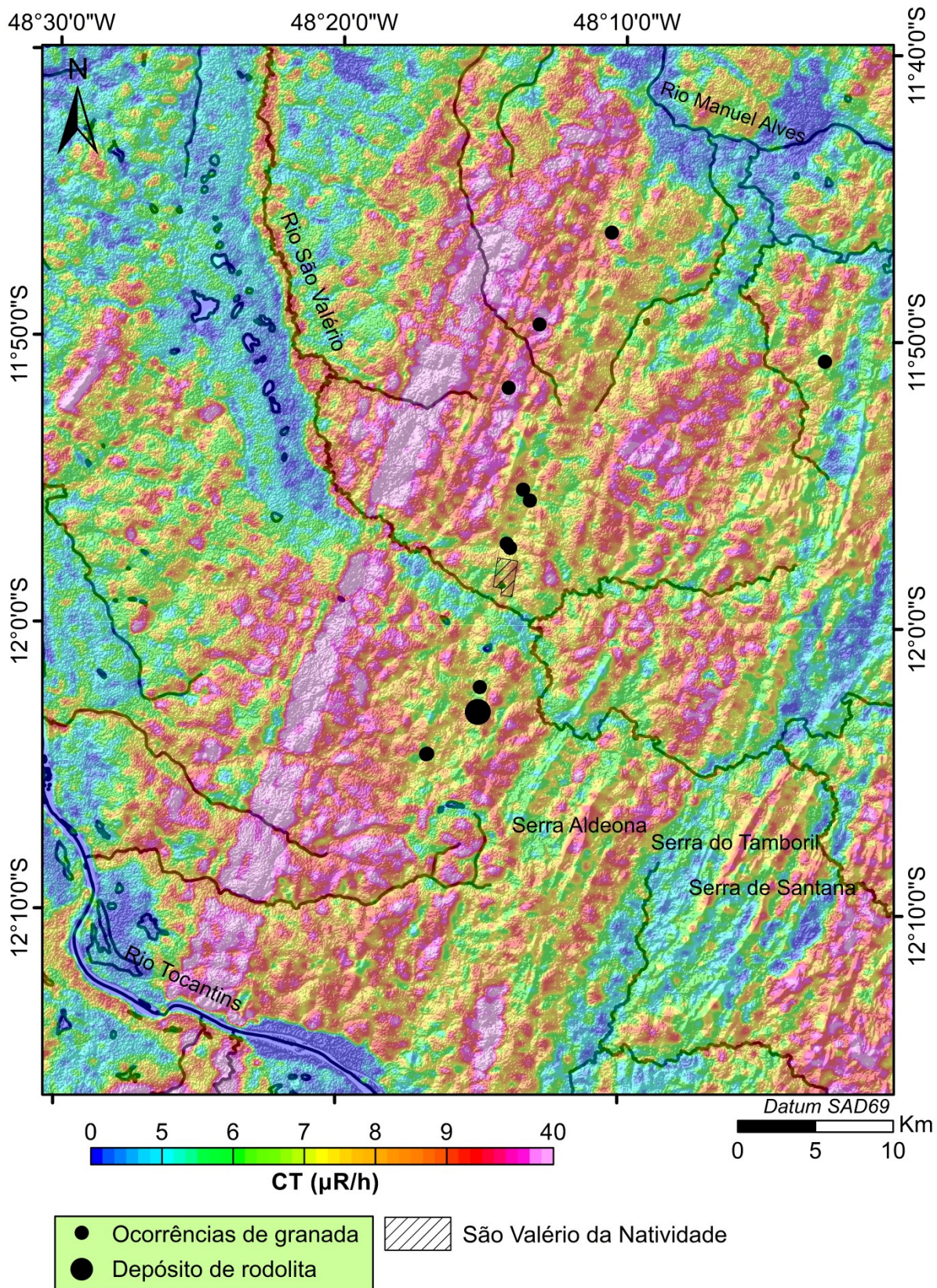
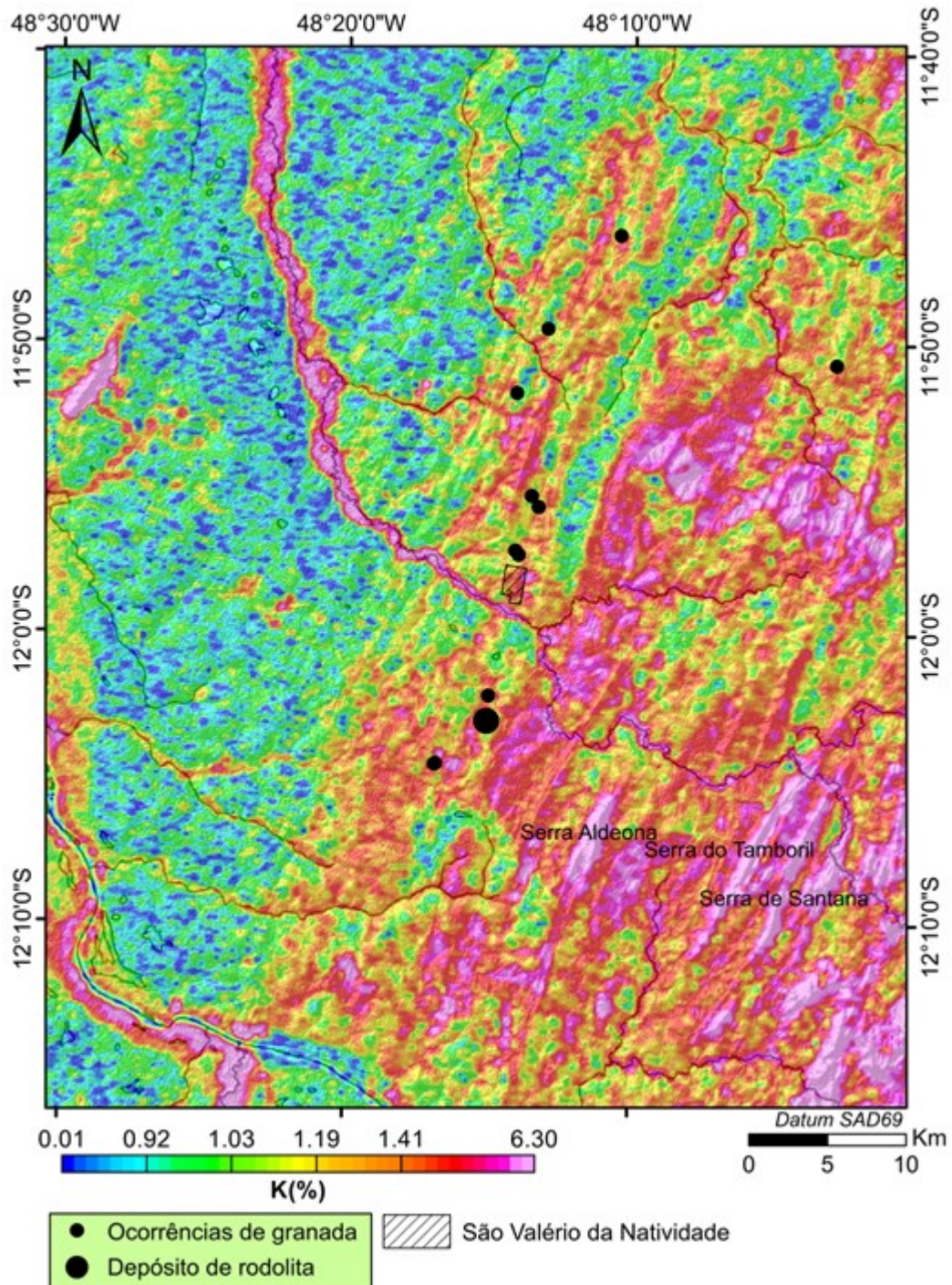


Figura 3.10 - Mapa da imagem contagem total da área de estudo.

### *Canais de K (%), eTh (ppm) e eU (ppm)*

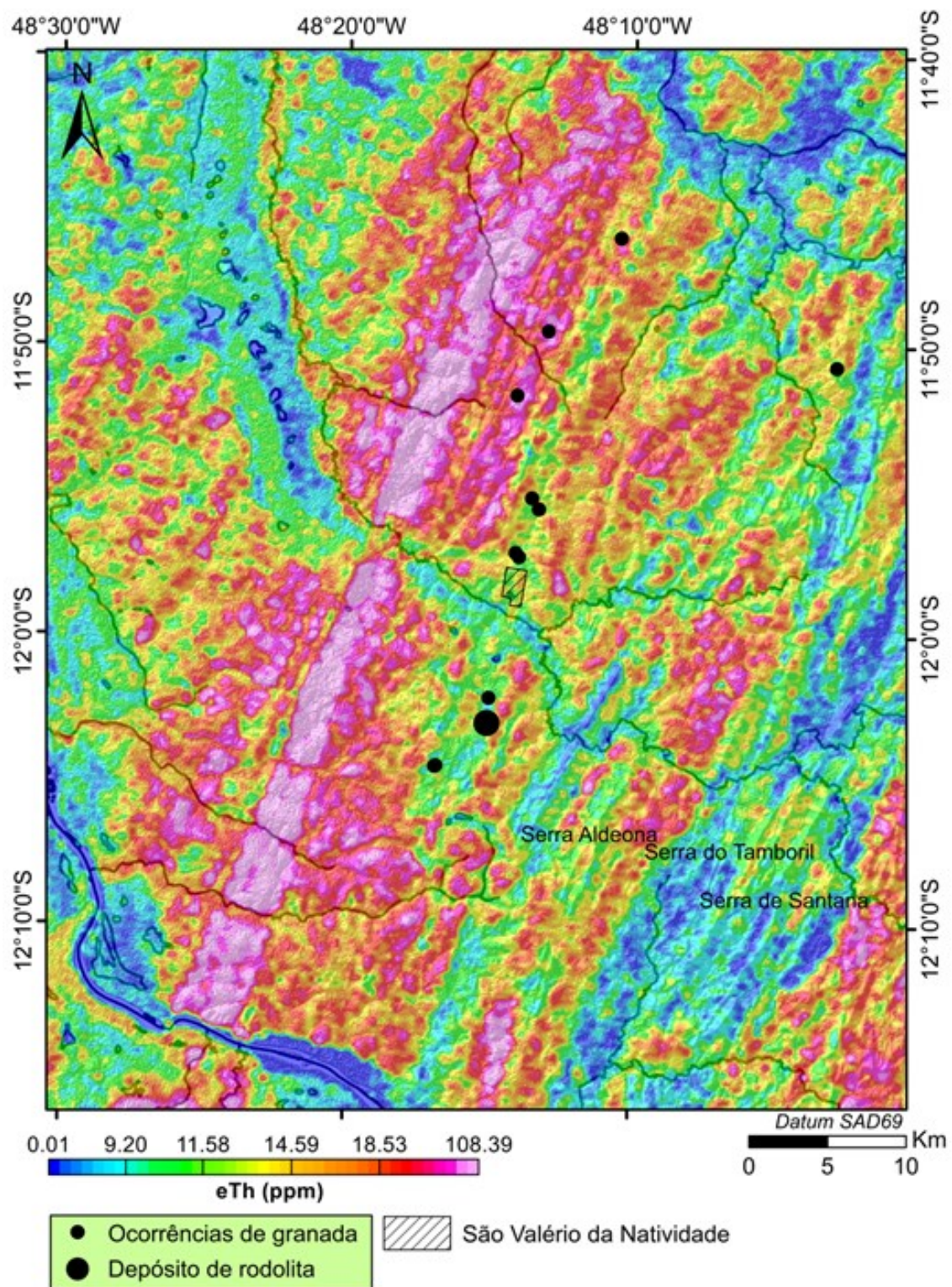
As imagens dos canais de potássio, equivalente tório e equivalente urânio representam as concentrações e distribuições dos radioisótopos nos materiais superficiais da área de estudo. As Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 mostram os resultados da interpolação dos dados dos canais de potássio, tório e urânio, respectivamente.

Após a análise dessas imagens-base, foi aplicada a técnica de realce RGB aos dados dos canais individuais de modo a representar os contrastes e limites radiométricos da área de estudo.

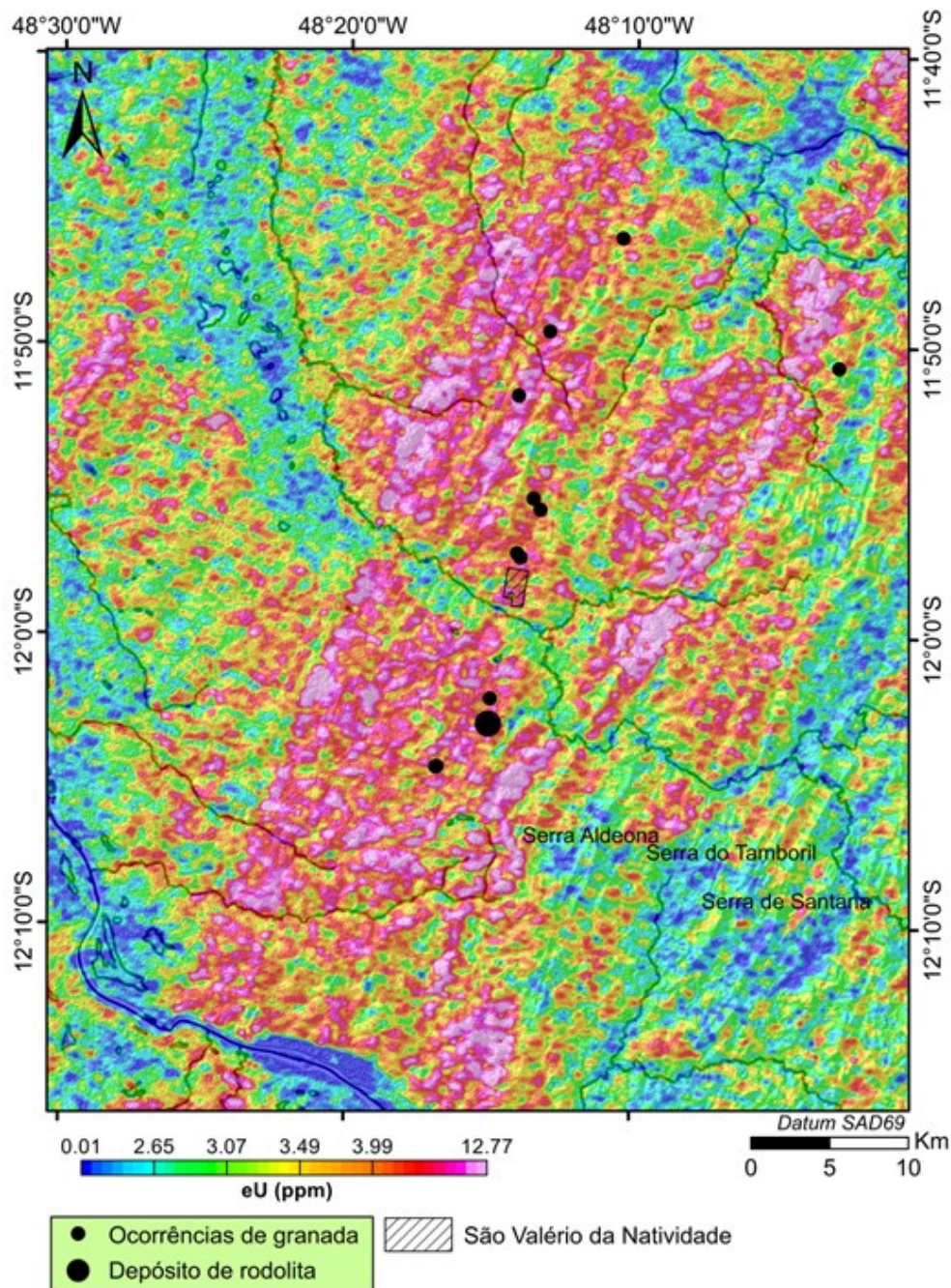


*Figura 3.11 - Mapa da imagem do canal de potássio da área de estudo.*





*Figura 3.12 - Mapa da imagem do canal equivalente tório da área de estudo.*



**Figura 3.13** - Mapa da imagem do canal equivalente urânio da área de estudo.

### **Razões de $eTh/K$ , $K/eTh$ , $eU/K$ e $eU/eTh$**

A técnica consiste em representar a razão entre as concentrações de tório ou urânio e a concentração de potássio. A técnica é aplicada para realçar o enriquecimento do potássio decorrente da ação de alteração hidrotermal associado às variações litológicas (Galbraith e Saunderas, 1983) e processos intempéricos regionais. As áreas com maior concentração de potássio apresentam valores mais baixos dessas razões. A Figura 3.14 apresenta as imagens das razões  $eTh/K$  e  $eU/K$ .

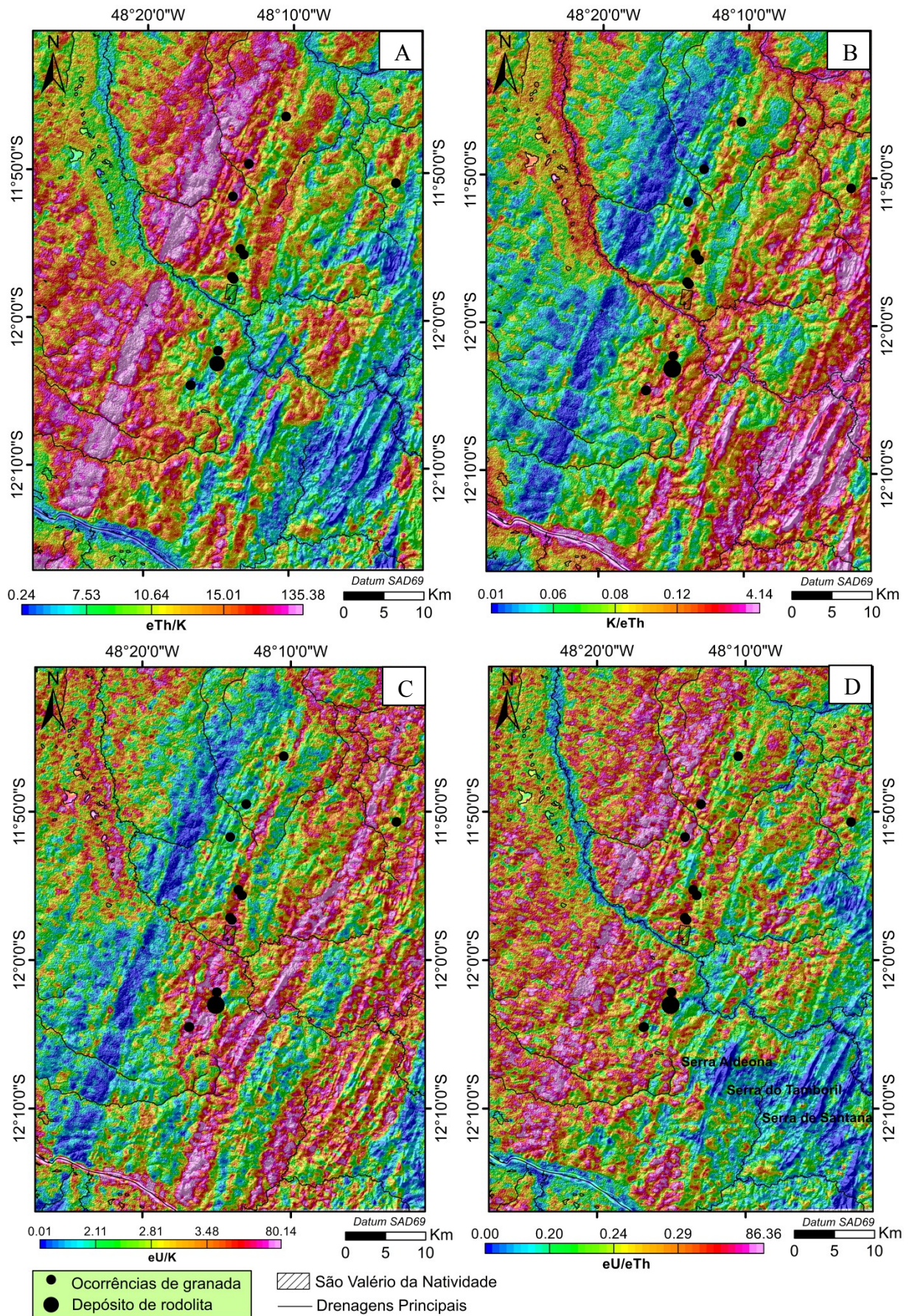


Figura 3.14 - Mapas das razões  $eTh/K$  (A),  $K/eTh$  (B),  $eU/K$  (C) e  $eU/eTh$  (D) da área de estudo.

### Parâmetro F ou Fator F

O método Parâmetro F (Efimov, 1978 *apud* Gnojeck e Prichystal, 1985) permite realçar, conjuntamente, o potássio e a razão eU/eTh. Valores altos de Fator F indicam rochas com halos de alteração potássica e filica. A técnica baseia-se na relação entre os canais de potássio, urânio e tório que é expressa com a Equação 3.8.

$$F = K \times \left( \frac{eU}{eTh} \right) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

A Figura 3.15 apresenta a imagem do parâmetro F.

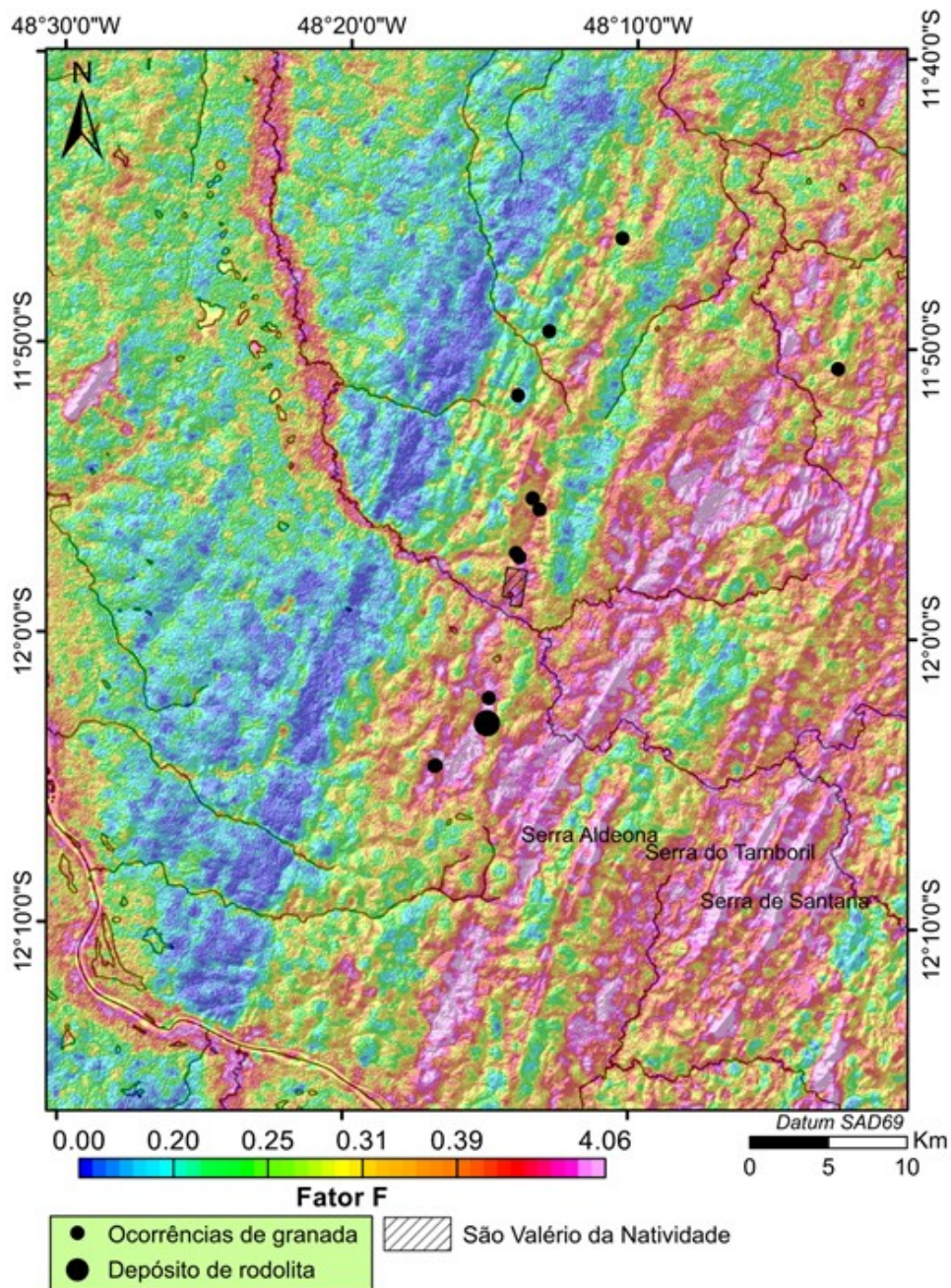


Figura 3.15 - Mapa da imagem do parâmetro F da área de estudo.

### Potássio Anômalo ( $K_d$ ) e Urânio Anômalo ( $U_d$ )

O enriquecimento de potássio causado por fatores secundários como ação de processos hidrotermais é realçado pela normalização dos radioelementos potássio e urânio em função dos valores de tório (Saunders *et al.*, 1987), pois o tório é imóvel, sendo ideal para traçar os efeitos litológicos primários (Dickson e Scott, 1997). A normalização supriria as contribuições primárias e preveria as zonas de alteração hidrotermal. Pires (1995) empregou a técnica do potássio anômalo pela primeira vez na prospecção mineral para identificação de zonas hidrotermais.

Os valores ideais de potássio ( $K_i$ ) e urânio ( $U_i$ ) definidos a partir do tório são calculados com as equações 3.9 e 3.10, onde  $K_s$ ,  $U_s$  e  $Th_s$  são os dados originais, e os desvios dos valores ideais são calculados a partir dos valores ideais através das Equações 3.11 e 3.12.

$$K_i = (\text{média de } K_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s \quad (\text{Eq. 3.9})$$

$$U_i = (\text{média de } U_s / \text{média de } Th_s) \times Th_s \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$K_d = (K_s - K_i) / K_i \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$U_d = (U_s - U_i) / U_i \quad (\text{Eq. 3.12})$$

A Figura 3.16 ilustra as imagens do potássio anômalo e urânio anômalo, respectivamente.

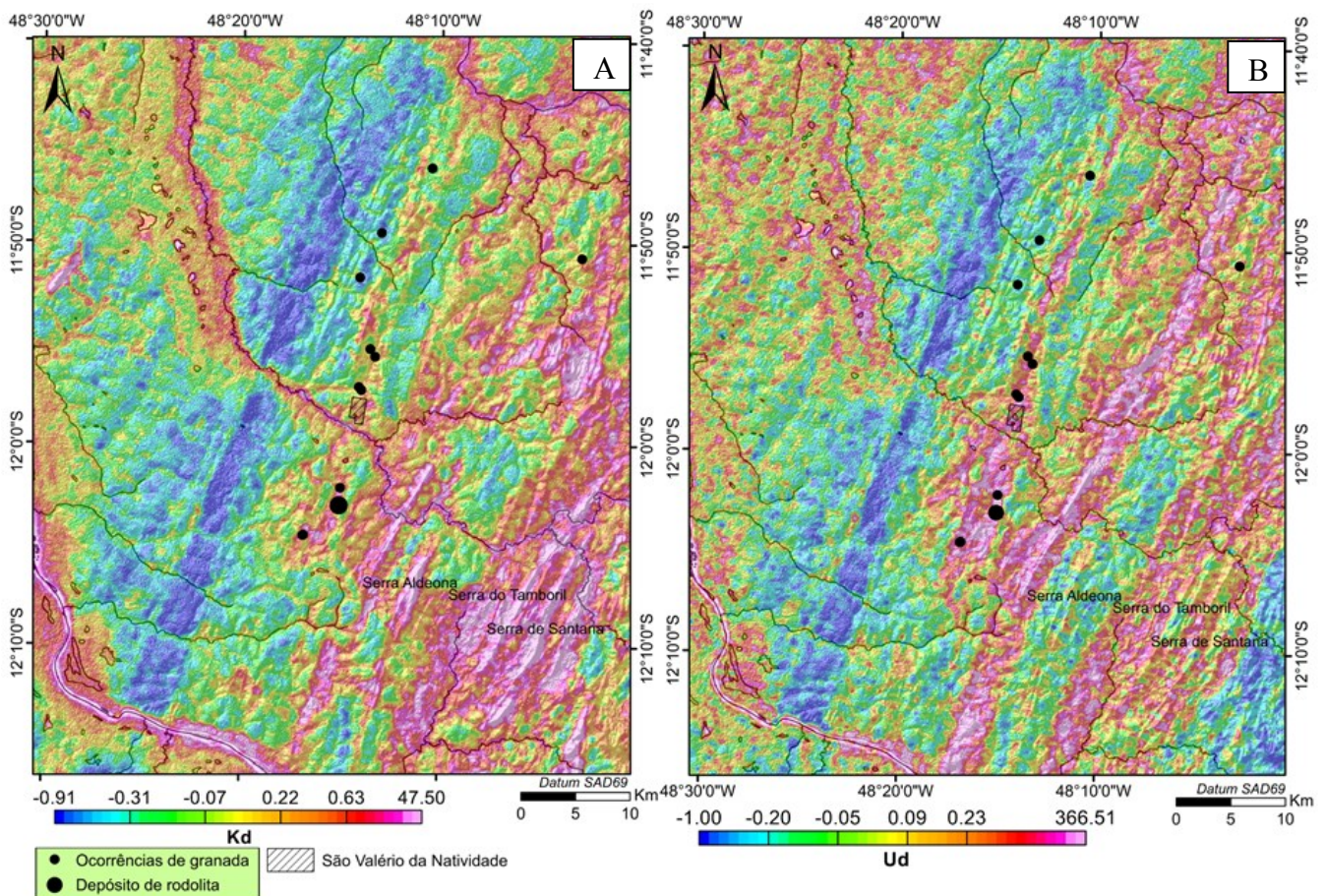


Figura 3.16 - Mapa do potássio anômalo (A) e urânio anômalo (B) da área de estudo.

### ***Composições Ternárias***

A técnica consiste em integrar os canais e gerar uma composição ternária a partir dos padrões de cores RGB (*Red, Green, Blue*). Para cada cor primária foi atribuído um canal, sendo os padrões de exibição representados por: *K-Red, eTh-Green, eU-Blue; Fator F-Red, Kd-Green, Ud-Blue; Fator F-Red, Kd-Green, K/eTh-Blue*. A imagem ternária gerada reflete a concentração de cada elemento nos domínios gamaespectrométricos da área. Para o RGB, as cores são aditivas, portanto, a coloração branca representa elevada concentração dos três canais e a coloração preta equivale a concentrações menores dos três canais. As imagens ternárias em RGB são apresentadas na Figura 3.17.

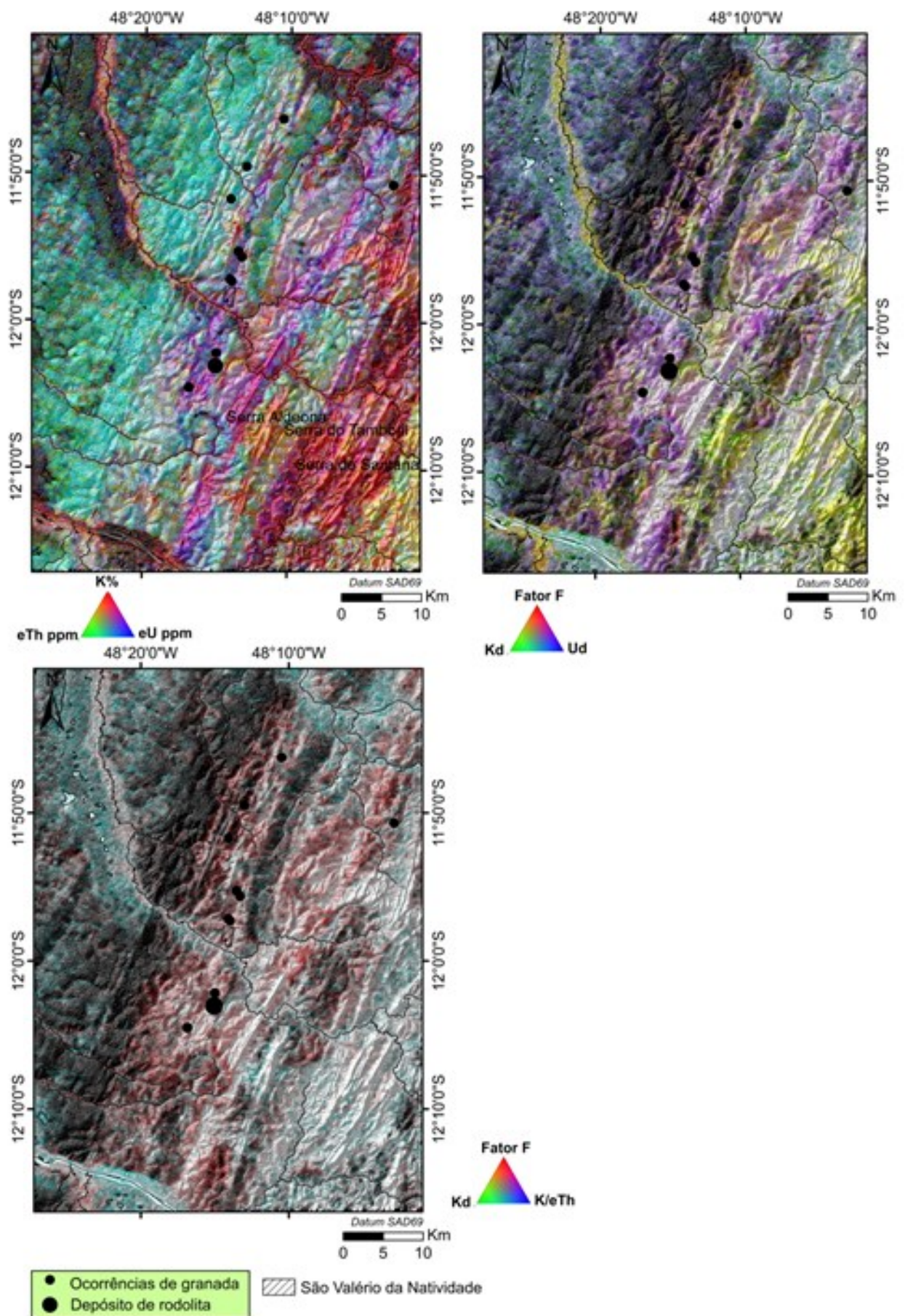


Figura 3.17 - Mapas ternários de composição colorida RGB da área de estudo.

## 1.4 Interpretação dos Dados Aerogeofísicos

A região de estudo está inserida no domínio do Lineamento Transbrasiliano na zona limítrofe entre o Arco Magmático de Goiás (neoproterozoico) e o Domínio Cavalcante Arraias (paleoproterozoico).

### 1.4.1 Produtos Magnetométricos

A análise das imagens magnetométricas consiste em definir domínios magnéticos e mapear as feições magnéticas indicativas de diques, zonas de cisalhamento, fraturas dentre outras. Na interpretação utilizou-se o termo lineamentos magnéticos para todas as feições lineares ou curvilíneas interpretadas na escala 1:300.000 associadas, possivelmente, a cristas lineares, linhas de fratura e de deslocamento (Hobbs 1904 e 1912 *apud* O'leary *et al.*, 1976) assinaladas nos produtos magnetométricos.

As interpretações das imagens magnetométricas foram auxiliadas pela cena SRTM com Resolução Espacial de 30 metros e mapa hidrográfico da área de estudo.

O mapa do campo magnético anômalo reduzido ao polo de continuação ascendente de 500 metros mostra dois domínios com assinaturas geofísicas distintas (Figura 3.18) e padrões deformacionais distintos.

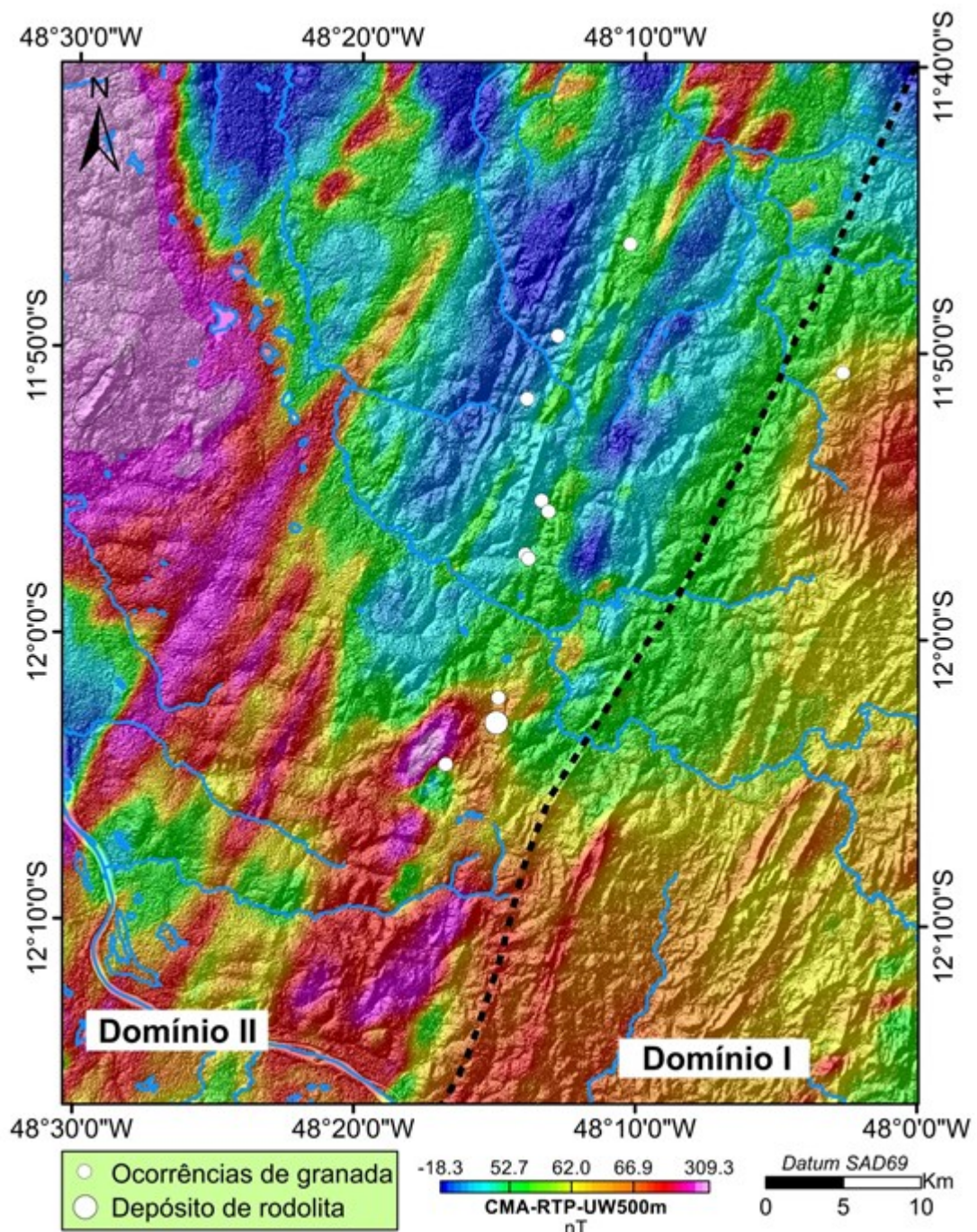
*Domínio magnético-estrutural I* - O domínio está localizado na porção sudeste da área de estudo e caracteriza-se pela assinatura magnética mais homogênea. No domínio são assinalados lineamentos contínuos e curvos que infletem-se para NE com altos valores magnéticos, > 66.9 nT. Esses lineamentos magnéticos representam altos topográficos cartografados na folha topográfica Bananal, nomeados de serras Aldeona, do Tamboril e de Santana (vide Figura 3.19). Geologicamente, as feições estruturais correspondem a unidades metassedimentares cartografadas como Grupo Traíras (Martins-Ferreira, 2017).

*Domínio magnético-estrutural II* - O domínio foi definido pela exposição de feições estruturais de direção preferencial NE concordantes com a estruturação do Lineamento Transbrasiliano. O domínio II apresenta maior variação de campo magnético com valores máximos e mínimos. Nesse domínio observam-se lineamentos contínuos e regionais com campo magnético de alta intensidade. Ainda nesse domínio, há exposição, sem forma característica e sem aparente estruturação, de valores intermediários de campo magnético entre aproximadamente 52 nT e 62.0 nT.

Os domínios I e II são balizados por uma zona de cisalhamento regional de cinemática dextral, provavelmente, a extensão da Zona de Cisalhamento Rio Maranhão que separa rochas com padrões deformacionais e graus metamórficos distintos do Grupo Serra da Mesa e Araí, mais a sul da área, como pode ser observado em Marques (2009). A zona de cisalhamento



regional foi traçada com auxílio do SRTM e a movimentação cinemática dextral foi observada no domínio radiométrico 5 ressaltado na composição ternária RGB.



**Figura 3.18** - Mapa do CMA-RTP-UW500metros sobreposto ao MDT da área de estudo mostrando os domínios magnéticos estruturais identificados e balizados por uma zona de cisalhamento regional

Na análise dos produtos magnetométricos (principalmente, ISA-GHT) verificou-se lineamentos dúcteis de direção NE interrompidos por lineamentos de direção SWW-NEE e NWW-SEE que indicam um evento rúptil mais recente. Esses lineamentos rúpteis foram interpretados a partir de rupturas e deslocamentos observados nas feições magnéticas. Esses lineamentos foram traçados com auxílio do SRTM e mapa hidrográfico da área de pesquisa. Os

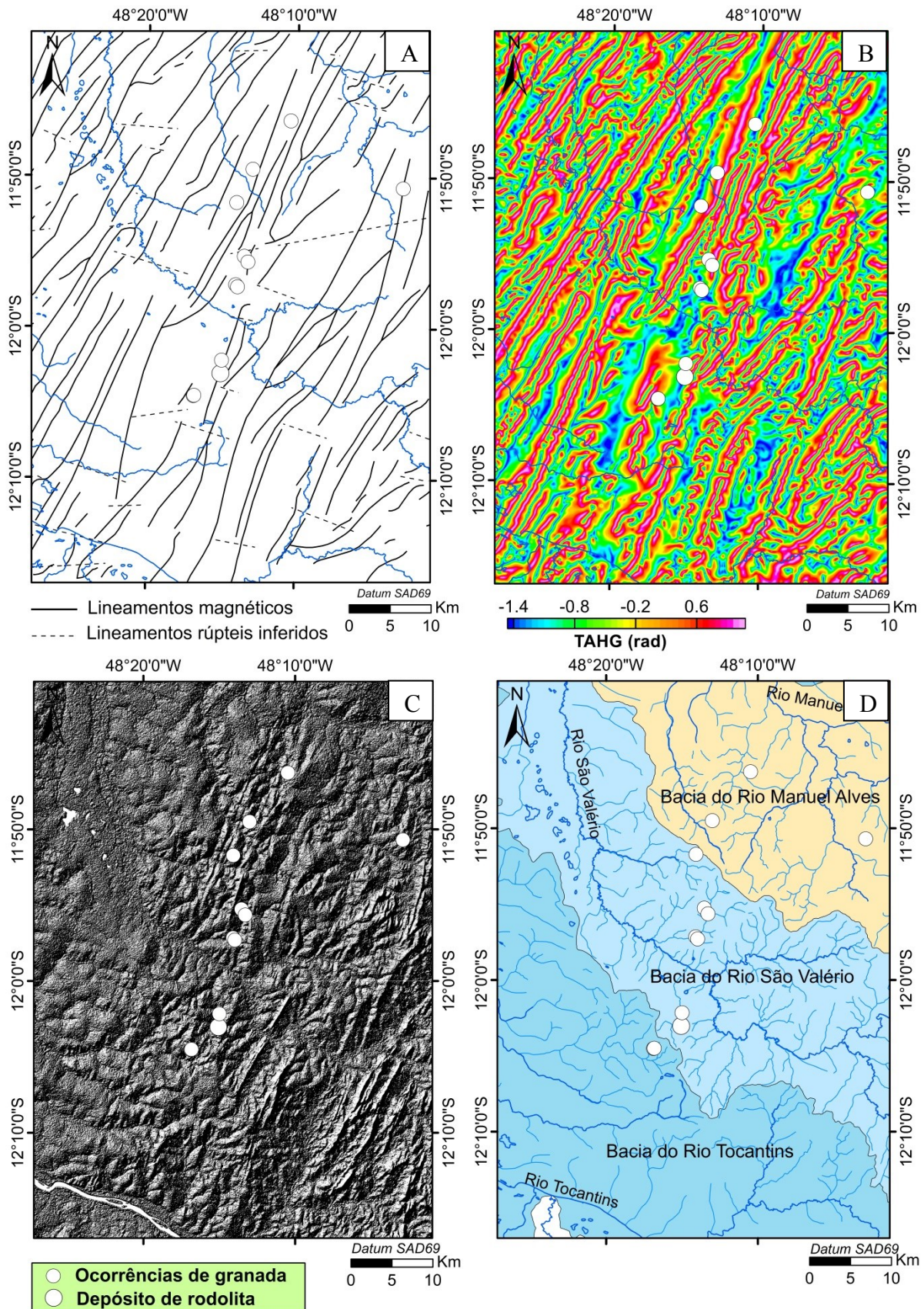
lineamentos SWW-NEE e NWW-SEE são interpretados como resultantes da componente principal brasileira E-W ou posteriores ao evento orogênico relacionado com o surgimento do Arco Magmático de Goiás. O mapa de lineamento magnético foi confeccionado com base na interpretação do ISA-GHT (Figura 3.9-B), onde foram considerados lineamentos, as feições lineares e curvilíneas (Figura 3.19).

O mapa de lineamentos magnéticos mostra o mesmo padrão estrutural observado em campo (vide a Figura 3.20), onde as rochas exibem uma foliação milonítica regional com orientação principal N05-20°E, e mergulhos subverticais no sentido principal NW.

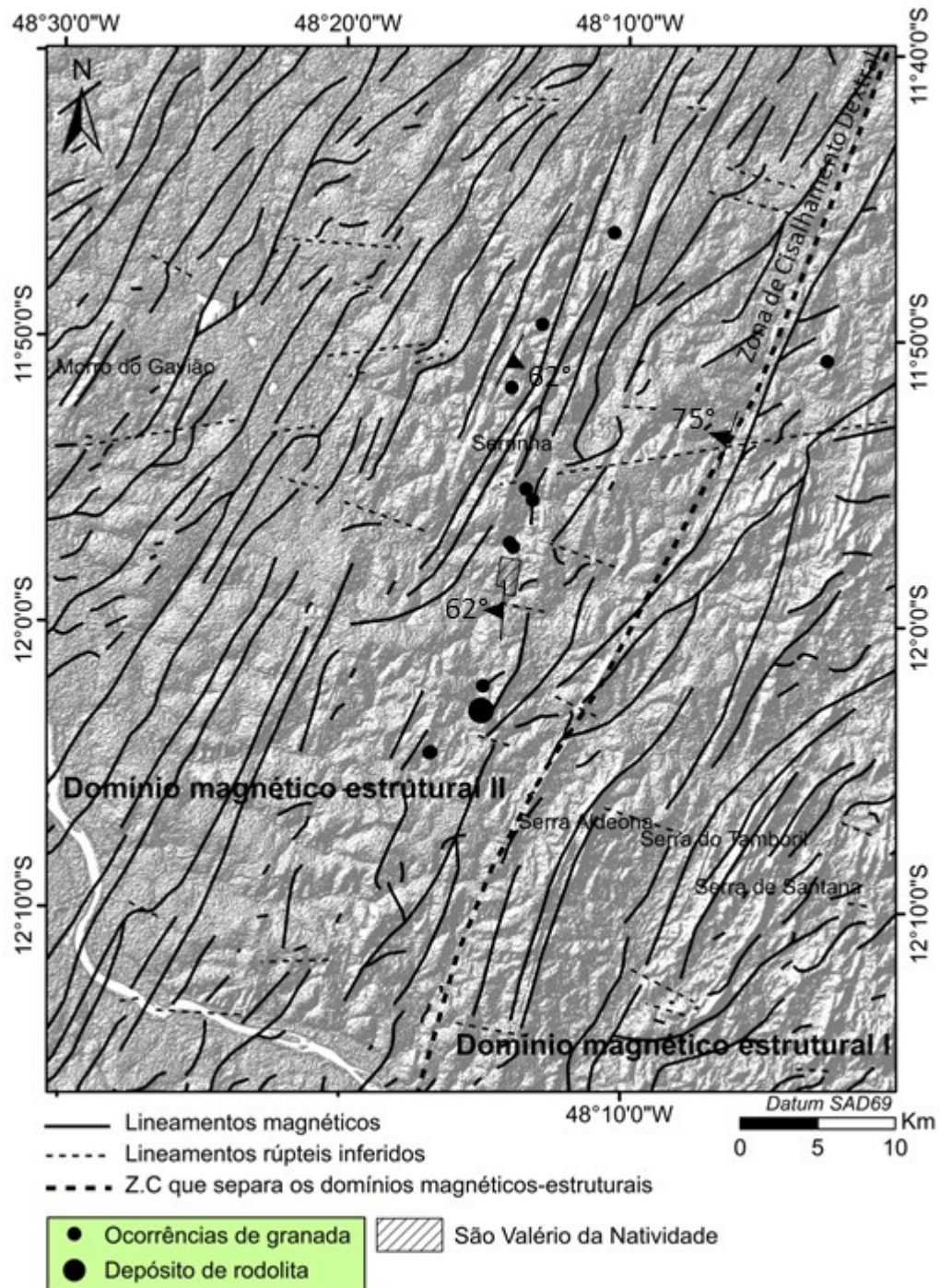
O mapa de lineamentos mostrou um ambiente mineralizador controlado por uma trama dúctil intersectada por estruturas rúpteis recentes de orientação SWW-NEE e NWW-SEE. O mapa também mostra dois domínios estruturais distintos separados por uma zona de cisalhamento N030°E.

As ocorrências de granada refletem provavelmente um evento termotectônico condicionado pela cinemática das estruturas e imposição de uma granitogênese brasileira acompanhada de processos hidrotermais. Entende-se que a configuração geológico-estrutural facilitou o desenvolvimento da mineralização.

As imagens magnéticas, como por exemplo, o ASA (Vide Figura 3.6), mostram que as ocorrências estão localizadas nas bordas de estruturas magnéticas NE associadas a amplitudes magnéticas baixas. Essas estruturas aparentam não ser mineralizadas. Entretanto, as estruturas, possivelmente, moderaram a circulação e/ou acúmulo de fluidos hidrotermais em sítios privilegiados que, entre outros fatores, permitiram o desenvolvimento das granadas.



**Figura 3.19** - Mapa de lineamentos magnéticos dúcteis de direção NE e lineamentos rúpteis inferidos de direção SWW-NEE e NWW-SEE da área de estudo (A) elaborado a partir de interpretações do ISA-GHT (B), da cena do SRTM (C) e do mapa hidrográfico (D).



*Figura 3.20 - Padrão estrutural observado em campo. Notar as três medidas decampo.*

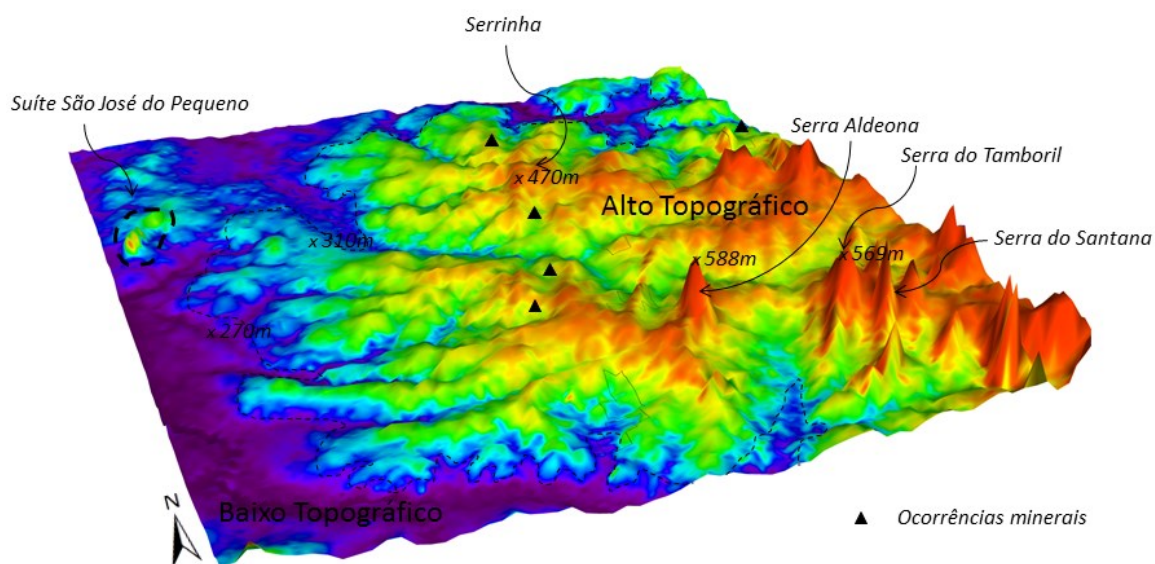
#### 1.4.2 Produtos Gamaespectrométricos

A interpretação das respostas gamaespectrométricas requer compreensão dos comportamentos geoquímicos dos radioelementos K, Th e U, da composição mineralógica das unidades geológicas da área de estudo, das alterações hidrotermais e intempéricas e do gradiente topográfico. Quando o relevo é escarpado ou o terreno é coberto por um manto residual pouco espesso, a imagem obtida reflete a concentração de radioelementos da rocha. Em casos em que o

relevo é aplainado e recoberto por solos espessos muito desenvolvidos pedogeneticamente pode haver o mascaramento do substrato.

### **Relação Topográfica**

Um modelo digital de terreno em 3D foi elaborado no Oasis *Montaj* para representação topográfica da área de estudo. O modelo da Figura 3.21 mostra os valores de cotas topográficas retirados das folhas topográficas Bananal e Apinajé, as serras cartografadas e as ocorrências de granada da área de pesquisa. Nota-se que o alto topográfico da área ocorre na porção central e sudeste da área. Os valores de cota topográfica inferiores a 300 m estão associados a altitudes mais baixas da área de pesquisa.



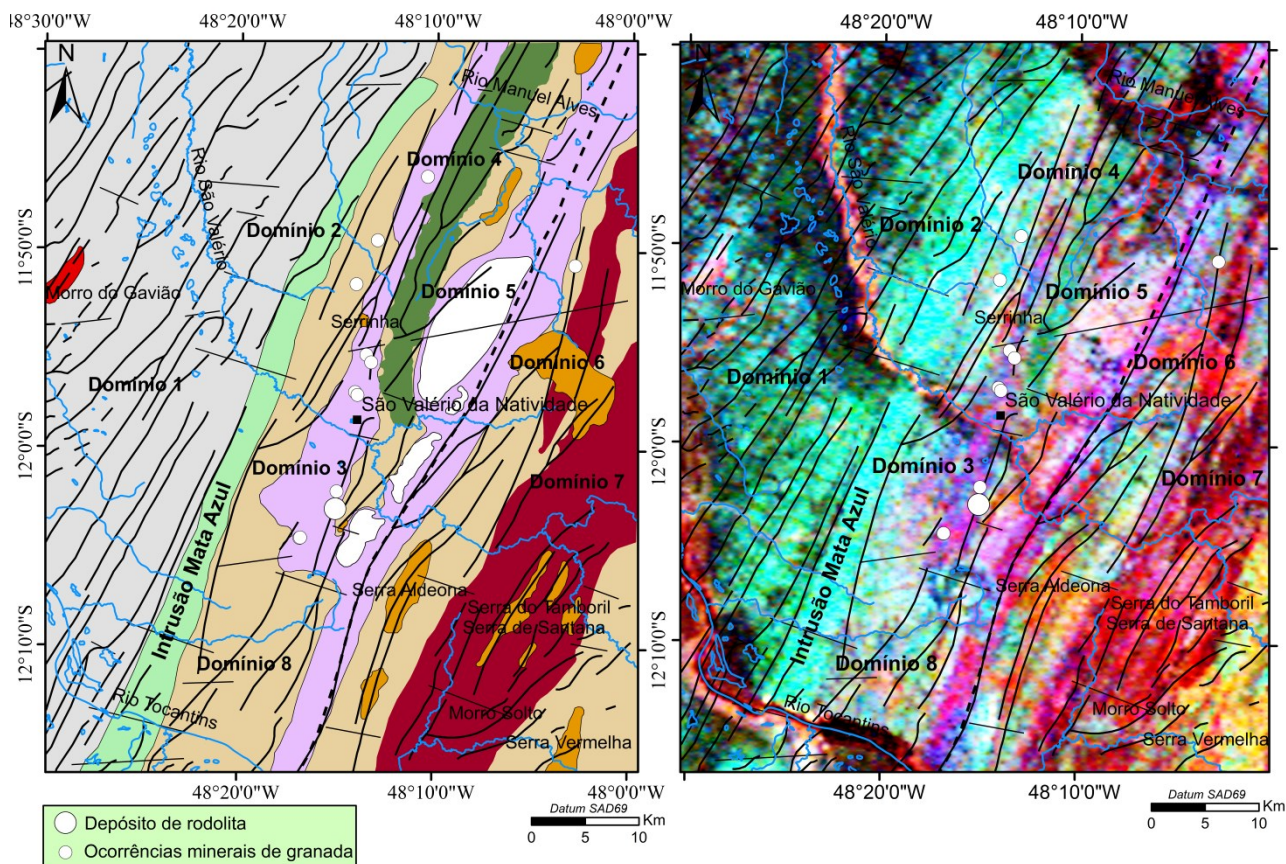
**Figura 3.21** - Modelo digital do terreno em 3D elaborado no Oasis *Montaj*.

Nos trabalhos de campo foram diagnosticados solos relativamente rasos, representados majoritariamente por cambissolos, e que comumente ocorre uma camada delgada de cascalho residual que recobre parte das exposições rochosas.

As imagens das variáveis básicas (potássio, tório e urânio) (Figuras 3.11, 3.12, 3.13) e contagem total (Figura 3.10), reproduzem lineamentos gamaespectrométricos na direção NE, localizados nas altitudes mais altas da área de pesquisa, com concentrações elevadas de potássio. Observa-se claramente o corpo granítico Mata Azul (Frasca *et al.*, 2010) com teores elevados de tório, na porção central da área, alongado na direção NE. Concentrações elevadas de urânio ocorrem no lineamento gamaespectrométrico de direção N20°E e no corpo Mata Azul.

A imagem da composição ternária (RGB) aponta oito domínios radiométricos definidos qualitativamente com base nos matizes que permitem distinguir as variações dos teores de K

(%), eTh (ppm) e eU (ppm). Os domínios radiométricos definidos são apresentados no mapa da Figura 3.22.



**Figura 3.22** - Domínios radiométricos definidos a partir do mapa de composição ternária (RGB) integrado ao mapa de lineamentos da área de estudo.

***Domínio 1 (baixo K, baixo eTh, baixo eU)***

O domínio 1 apresenta baixa concentração de radioisótopos, no entanto, com expressão relativa de tório. Partindo das informações geológicas regionais, o domínio representa os ortognaisses tonalíticos a dioríticos do Arco Magmático de Mara Rosa.

***Domínio 2 (baixo K, alto eTh, baixo eU)***

O domínio 2 é definido pelo alto conteúdo de tório e baixa concentração de potássio e urânio. Apesar de a composição ternária RGB expressar alta concentração de tório, a imagem de equivalente urânio mostra que o domínio também apresenta alta concentração de urânio, isso sugere que a concentração do tório é mais significativa que a do urânio.

O domínio corresponde à suíte Mata Azul, sin-tectônica, cartografada nas cartas geológicas Gurupi e Bananal.

### ***Domínio 3 (alto a médio K, baixo a médio eTh, alto a médio eU)***

O domínio 3 revela concentrações elevadas de potássio e urânio, característico de um campo de alteração hidrotermal (Ostrovskiy, 1975), ao longo de uma zona de cisalhamento de direção geral NE. As concentrações do potássio e urânio ao longo do *trend* são variáveis e, provavelmente, deve-se a diferença entre os comportamentos geoquímicos dos radioelementos.

Em campo, constatou-se a presença de processos de sericitização e potassificação nas rochas, desse domínio, que estão injetadas por apófises graníticas.

A maior parte das ocorrências de granada ocorre nesse domínio, inclusive a jazida de rodolita, que ocorre ligeiramente em cima de uma anomalia de potássio, o que aponta para uma mineralização associada a processos hidrotermais. Em campo, na região do depósito, foram observados porfiroblastos de rodolita em xisto alterado hidrotermalmente, rico em biotita.

O domínio é importante do ponto de vista prospectivo, uma vez que, o *trend* das ocorrências de granada da região de São Valério da Natividade está relacionado ao campo hidrotermal desenvolvido pela intrusão Mata Azul.

### ***Domínio 4 (baixo K, médio eTh, baixo eU)***

O domínio 4 é caracterizado por baixos valores de potássio, médios valores de tório e baixos a médios valores de urânio. A imagem da amplitude do sinal analítico também ressalta o domínio.

Na carta Gurupi está cartografado, nessa região do domínio 4, a Formação Morro do Carneiro do Grupo Riachão do Ouro, composta restitos de formação ferrífera e manganésifera, no entanto, a unidade geológica não apresenta correlação espacial com o domínio radiométrico.

### ***Domínio 5 (alto K, alto eTh, alto eU)***

O domínio 5 corresponde a feições com concentrações elevadas nos três radioelementos na borda oeste da zona de cisalhamento regional. Uma das feições corresponde a um grande sigmóide de cinemática dextral com alta concentração de radioelementos K, Th e U.

Em campo, o afloramento AD001 marca o contato do domínio 5 com o domínio 3, representado por muscovita-quartzo xisto milonitizado injetado por veios de quartzo de grandes dimensões que eventualmente apresentam fenocristais de muscovita.

Não há registros nas cartas geológicas de unidades geológicas compatíveis com a assinatura gamaespectrométrica e nem o contorno do domínio 5.

### ***Domínio 6 (alto K, média eTh, baixo eU)***

O domínio 6 é composto por unidades radiométricas com concentração elevada de K e média de Th. Apresenta cor alaranjada e suas unidades representativas estão localizadas na porção sudeste da área, onde diz respeito aos altos topográficos de direção NE. Outras feições menores com matiz similar foram agrupadas nesse domínio.

Cartograficamente, as unidades geológicas da porção sudeste, relativas ao domínio, correspondem ao Grupo Traíras do sistema de *rift* intracontinental.

### ***Domínio 7 (médio a alto K, baixo eTh, baixo a médio eU)***

O domínio 7 apresenta baixa concentração de tório e expressões variáveis de K e equivalente U. O domínio, supostamente, represente um campo hidrotermal desenvolvido em unidade metassedimentar.

Nenhuma unidade geológica nas cartas Gurupi e Bananal apresenta correlação com o domínio radiométrico.

### ***Domínio 8 (médio a baixo K, alto a médio eTh, baixo eU)***

O domínio 8 representa o Domínio Cavalcante Arraias. Esse domínio apresenta feições com valores médios a baixos de potássio, altos a médios de tório e valores baixos de equivalente urânio.

Na carta Gurupi está cartografado a unidade ortognáissica e granítica do Complexo Almas-Cavalcante.

### ***Mapas ternários Fator F-Red, Kd-Green, Ud-Blue e Fator F-Red, Kd-Green, K/eTh-Blue***

Os mapas ternários foram elaborados com o intuito de verificar os locais mais hidrotermalizados dentro do campo hidrotermal identificado (Domínio 3). As áreas em branco, que representam concentrações maiores, nas zonas de cisalhamento prospectivas, seriam os locais de alteração hidrotermal e potenciais para a granada. Nota-se que o *trend* de ocorrências de granada, onde está o depósito, está posicionado nas porções esbranquiçadas e que nas ocorrências mais a norte, de baixo potencial de produção, não estão nesses locais. Em campo, o local das ocorrências mais norte, ocorrem biotita gnaisse, enquanto, na região do minério xistos hidrotermalizados.

A zona de cisalhamento regional dextral apresenta muitos locais esbranquiçados, portanto, interessante do ponto de vista prospectivo.



### ***Razões eTh/K, K/eTh, eU/K e eU/eTh***

As imagens das razões (Figura 3.14) mostram uma concentração elevada de potássio nos lineamentos estruturais da porção leste e sudeste da área de estudo o que sugere uma percolação por fluidos hidrotermais através dessas discontinuidades. A resposta geofísica é confirmada pela granitogênese brasileira Mata Azul, acompanhada por processos hidrotermais, descrita por Frasca *et al.* (2010).

A razão eTh/K é utilizada para estudo de áreas mineralizadas afetadas por processos hidrotermais potássicos (Shieves *et al.*, 1997), que devido a baixa mobilidade geoquímica do tório (traçador litológico), permite realçar o enriquecimento de potássio decorrente da ação de processos hidrotermais. A razão mostra que os lineamentos da porção leste e sudeste da área são enriquecidos em potássio.

As razões eU/K e eU/eTh (Figura 3.14-C e D) indicam uma dispersão do urânio no sentido NW (baixo topográfico da área) e uma concentração anômala de urânio nas zonas de cisalhamento de direção N030°E, respectivamente.

Os locais das ocorrências de granada mais a sul do *trend* mineralizante apresentam baixas razões eTh/K e eU/K, o que confirma a associação da mineralização com processos hidrotermais. As demais ocorrências da área de estudo são posicionadas sobre assinaturas com valores intermediários a altos de eTh/K e eU/K. Essas últimas ocorrências apresentaram baixa produção de granadas.

### ***Parâmetro F***

A técnica foi aplicada para confirmar se o enriquecimento de potássio observado nas razões está associado a processos hidrotermais. O Fator F assinalou uma zona na porção central e sudeste da área com altos teores de potássio (Figura 3.15).

### ***K Anômalo e U anômalo***

A imagem  $K_d$  ressalta, além da zona hidrotermal, picos anômalos, como no caso da anomalia sobre a mina de rodolita (Figura 3.16-A), ao longo das zonas de cisalhamento que estão associadas ao campo hidrotermal. As ocorrências ao norte do *trend*, não situadas no feixe hidrotermal e de baixo potencial de produção, apresentam valores baixos a intermediários de  $K_d$ , entretanto, as ocorrências ao sul, na região da mina de rodolita, estão posicionadas sobre focos anômalos de  $K_d$ , o que reflete o xisto biotitizado.

A imagem do  $U_d$  reflete claramente o feixe hidrotermal, principalmente na zona de cisalhamento N030°E (Figura 3.16-B), o que infere a presença de urânio no sistema hidrotermal de São Valério da Natividade. As ocorrências situadas ao norte apresentam valores baixos e intermediários de  $U_d$  e as ocorrências centrais e ao sul, valores altos a intermediários.

## IV ASSINATURAS GEOFÍSICAS E DISCUSSÃO

As análises e interpretações dos dados aéreos de magnetometria e gamaespectrometria permitiram o reconhecimento de alguns controles condicionantes da existência de ocorrências de granada na região de São Valério da Natividade. Esses métodos geofísicos reproduziram uma excelente resposta geofísica das feições estruturais e do campo de alteração hidrotermal desenvolvido a partir de rochas graníticas de caráter sin- a pós-colisional.

As ocorrências de granada estão localizadas ao longo de zonas de cisalhamento regionais de direção NE que controlam a distribuição das zonas hidrotermais associadas ao evento neoproterozoico.

O ambiente metalogenético responsável pela formação dos depósitos de granada é caracterizado na superfície por uma faixa hidrotermal com rochas alteradas representadas por xistos foliados a milonitizados ricos em biotita ou muscovita, especialmente variável para biotita gnaisses com bandamento irregular e granadas milimétricas disseminadas, e injeções leucograníticas com termos pegmatíticos. As alterações hidrotermais associadas às rochas são do tipo fílica, com desenvolvimento de silicificação manifestada principalmente na forma de veios de quartzo com fenocristais de muscovita não orientados, e potássica com intenso desenvolvimento de biotita na zona do depósito. Este arranjo mineralógico sugere uma relação metassomática para o desenvolvimento da rodolita que ocorre como fenoblastos centimétricos em xistos biotitizados. Essa relação é confirmada pelos dados geocronológicos obtidos por Frasca *et al.* (2010) em granadas de ocorrências próximo ao depósito de rodolita.

Sabe-se que os depósitos minerais metassomáticos podem ser formados simultaneamente a conversão metassomática da rocha encaixante ou tardiamente em rochas alteradas, pelas mesmas soluções hidrotermais, que atuaram como ambiente favorável para acumulação de elementos maiores (Ostrovskiy, 1975). O reconhecimento dessas unidades geológicas que desempenharam o papel de “esponja” geoquímica não é foco do trabalho, mas é importante para a prospecção desses depósitos de rodolita.

Na África Oriental, inúmeras ocorrências de rodolita são associadas a processos metassomáticos. Simonet *et al.* (2002) distinguem dois tipos de ocorrências de rodolita: (i) uma associada a uma zona de cisalhamento, onde a mineralização originou-se da transformação metassomática de granada-gnaisses em biotititos; (ii) e outra, associada à zona de contato entre gnaisses ou pegmatitos e rochas ultramáficas, onde teve contribuição dessas últimas rochas, indicada pelos altos teores de Mg, Cr e Ni.

Aparentemente, a mineralização de rodolita de São Valério da Natividade foi

desenvolvida a partir de sistemas hidrotermais em ambientes dúcteis com envolvimento de rochas quartzo-feldspáticas que apresentam incrementos de potássio e perdas de componentes alcalinos com formação de micas induzidas pelos processos metassomáticos, como descrito por Dipple (1992).

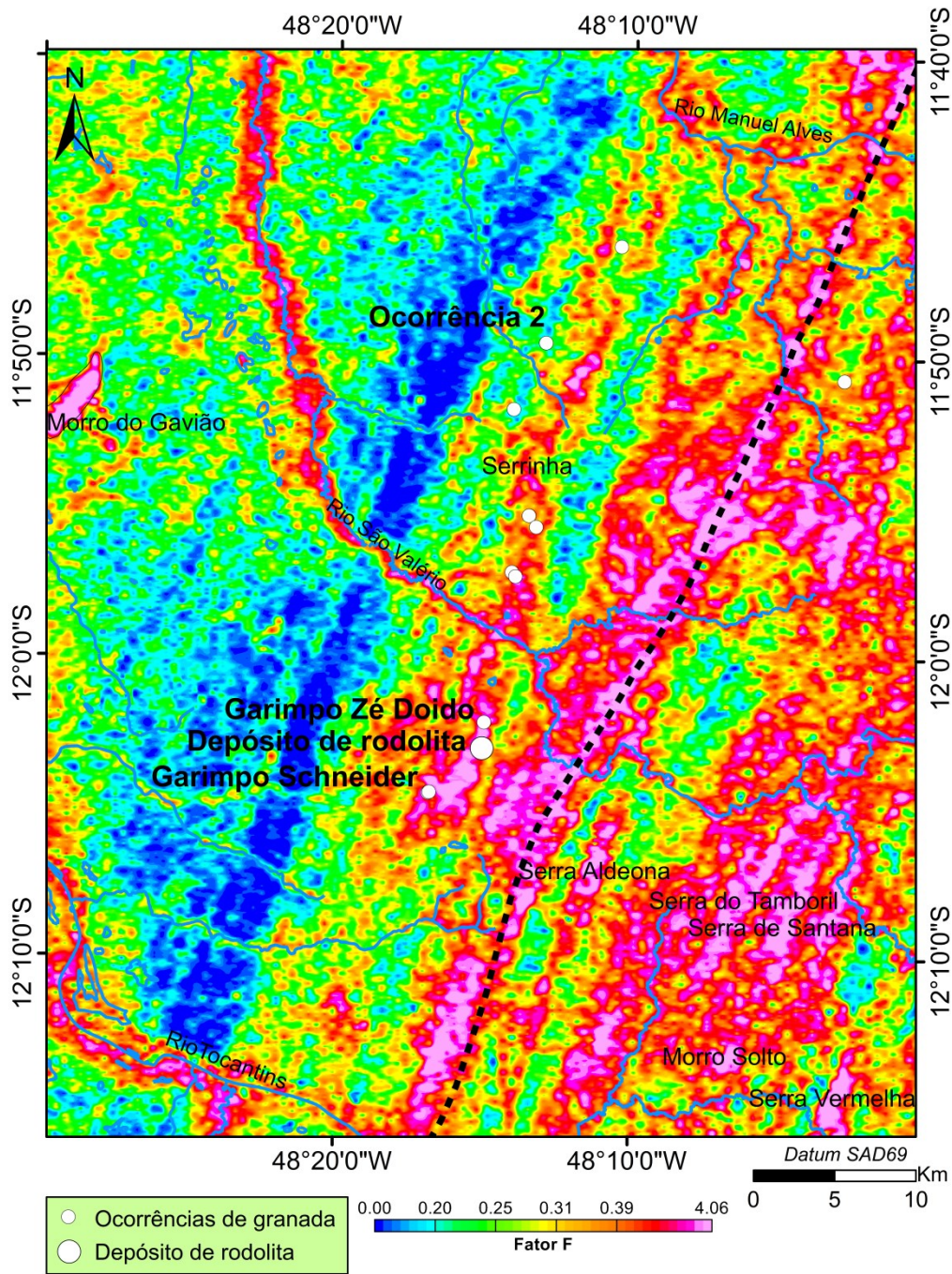
O depósito de rodolita de São Valério da Natividade ocorre onde as intensidades das anomalias de potássio são altas e as amplitudes magnéticas são baixas. Estas feições são consideradas a assinatura típica do depósito.

A baixa amplitude magnética sugere que a disposição espacial e cinemática das estruturas interpretadas teve um papel fundamental na distribuição e acumulação dos fluidos em sítios metassomáticos favoráveis para formação da rodolita. Também sugere que o meio mineralizador é essencialmente associado a rochas graníticas félsicas com restrita ou nenhuma contribuição de rochas ou fluidos derivados de rochas máficas.

Partindo do princípio que o tório não acompanha o potássio durante os processos de alteração hidrotermal e que o potássio está sempre presente nas soluções hidrotermais (Galbraith e Saunders, 1983; Ostrovskiy, 1975; Pires, 1995), os halos de potassificação foram rastreados pela gamaespectrometria aérea (Dickson e Scott, 1997) e definidos por meio das razões, principalmente a razão  $eTh/K$  (Schives *et al.* 2000), parâmetro F (Efimov, 1978 *apud* Gnojeck e Prichystal, 1985) e K anômalo (Pires, 1995). Essas técnicas de realce evidenciaram áreas com anomalias de K e empobrecimento de tório (antagonismo de Ostrovskiy, 1975) ao longo da zona de cisalhamento NE na porção central da área e nos lineamentos associados às unidades do Grupo Traíras na porção sudeste da área de pesquisa. Esse resultado é importante para a pesquisa prospectiva, pois definiu setores de anomalias de K que podem ser mineralizadas.

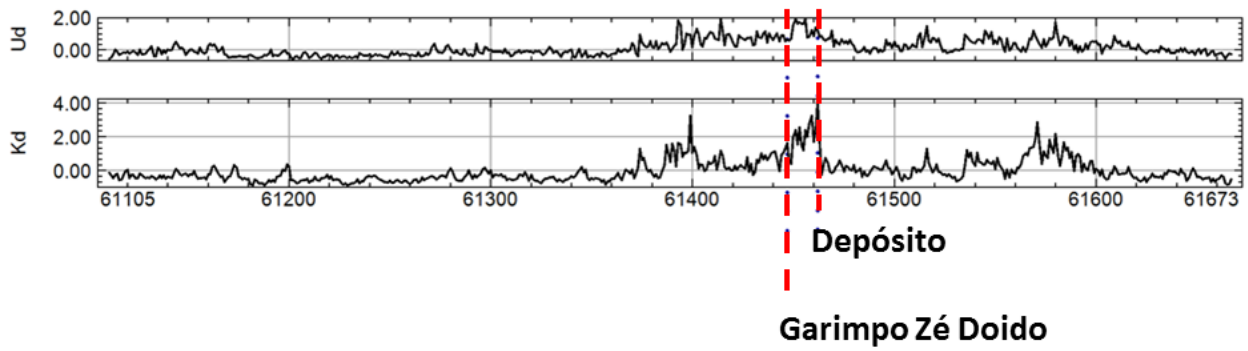
Com o objetivo de verificar qualitativamente e comparar as assinaturas entre as ocorrências foram elaborados perfis geofísicos a partir de linhas de voo que intersectam o depósito, o garimpo Zé Doido e Schneider e uma ocorrência localizada na porção norte do *trend* que representa a ocorrência com baixo potencial de produção. O garimpo Zé Doido, garimpo Schneider e o depósito de rodolita estão próximos entre si e representam as ocorrências com maior potencial de produção. Segundo Frasca *et al.* (2010), os garimpos Schneider, Zé Doido e Gabi chegaram a produzir juntos ao redor de duas toneladas de granada por mês. A Figura 4.1 mostra a localização das ocorrências analisadas.

A avaliação qualitativa consistiu em observar os valores gamaespectrométricos do banco de dados do Projeto Aerogeofísico Tocantins, os perfis geofísicos e as assinaturas geofísicas expressas nas imagens radiométricas obtidas no processamento dos dados.



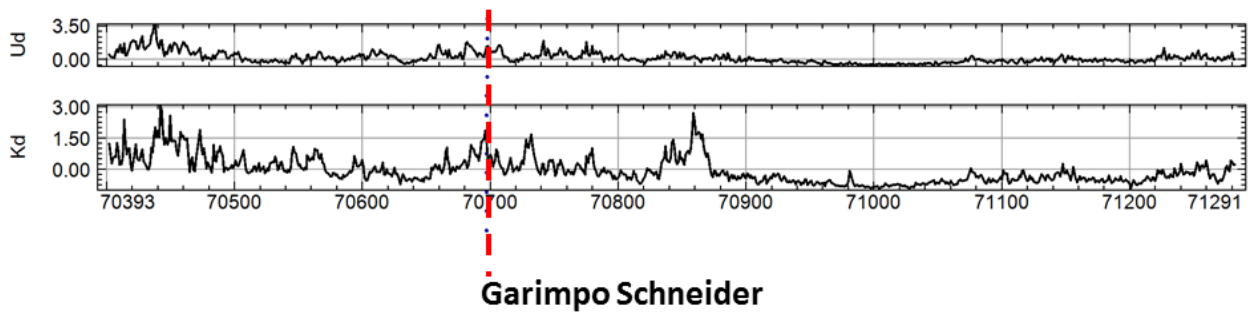
**Figura 4.1** - Mapa do Fator F com a localização das ocorrências de granada.

Os perfis geofísicos da Mina Rodolita e do garimpo Zé Doido, locais onde ocorrem pequenos cristais de granada mal formados e intemperizados na superfície, mostram anomalias de K anômalo e médios valores de U anômalo, entretanto, na mina, os valores de K anômalo são mais elevados, chegando a 4,13. É importante salientar que o valor do potássio anômalo da mina é maior que os das outras ocorrências da região de São Valério da Natividade. A Figura 4.2 mostra os perfis geofísicos do urânio e potássio anômalo do depósito e do garimpo Zé Doido.



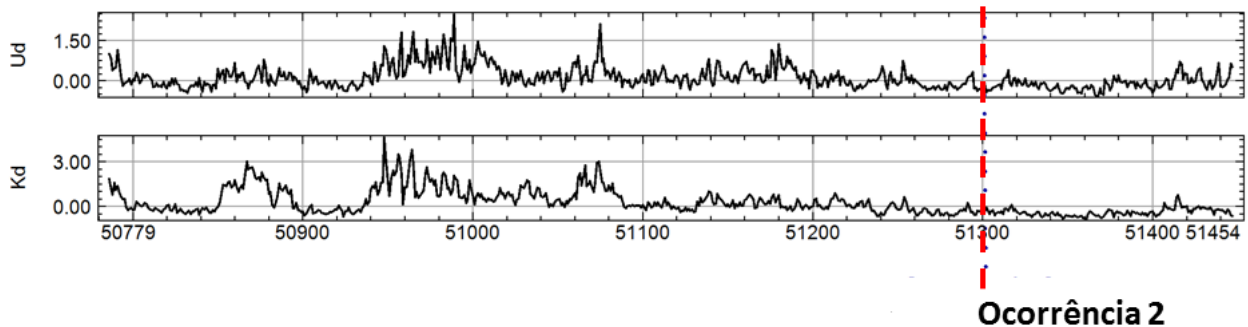
**Figura 4.2** - Perfis geofísicos do  $U_d$  e  $K_d$  da L22750 que intersecta o garimpo Zé Doido e o depósito rodolita.

Os perfis geofísicos do garimpo Schneider mostram que as concentrações radiométricas de  $K_d$  está em torno de 1,38 e os valores de U anômalo estão próximos com os da mina. A Figura 4.3 exhibe os perfis geofísicos do urânio e potássio anômalo do garimpo Schneider.



**Figura 4.3** - Perfis geofísicos do  $U_d$  e  $K_d$  da L22680 que intersecta o garimpo Schneider.

A ocorrência 2 está situada fora do feixe hidrotermal (Figura 4.1) e os seus perfis geofísicos mostram valores baixos de K anômalo ( $< 1$ ) e de urânio anômalo. Na área da ocorrência 2 ocorrem cristais de granadas intemperizados na superfície e biotita gnaisse com cristais milimétricos disseminados (Figura 2.6, Foto A e B). A Figura 4.4 exhibe os perfis geofísicos da ocorrência 2.



**Figura 4.4** - Perfis geofísicos do  $U_d$  e  $K_d$  da L22820 que intersecta a ocorrência 2.

A análise dos perfis e dos valores de potássio anômalo dessas ocorrências sugere que os valores entre 1,38 e 4,13 estão associados a áreas potassificadas e produtivas para a granada. Partindo para a prospecção, valores similares que podem ser encontrados ao longo da zona de cisalhamento, possivelmente, indicaram sítios promissores de mineralização.

Nos dados gamaespectrométricos do projeto aerogeofísico são encontrados valores extremos de K anômalo, como 17,09, que estão concentrados nos lineamentos do Grupo Traíras, porém, não se tem conhecimento de ocorrências nessa porção da área de pesquisa. Isso sugere, sem observações detalhadas de campo e até o presente momento, que a mineralização está associada ao contexto dos metagranitoides milonitizados.

Para a prospecção de novos alvos na região de São Valério da Natividade podem ser destacados os seguintes critérios:

- I.** Domínio magnético-estrutural I;
- II.** Lineamentos magnéticos de direção N05-30°E, os quais se associam processos de alteração hidrotermal;
- III.** Sítios com baixa amplitude magnética;
- IV.** O domínio gamaespectrométrico 3 (campo hidrotermal);
- V.** Picos destoantes de K anômalo próximo de 4.13 indicativos de locais com intensa alteração hidrotermal;
- VI.** Baixa razão  $eTh/K$ .

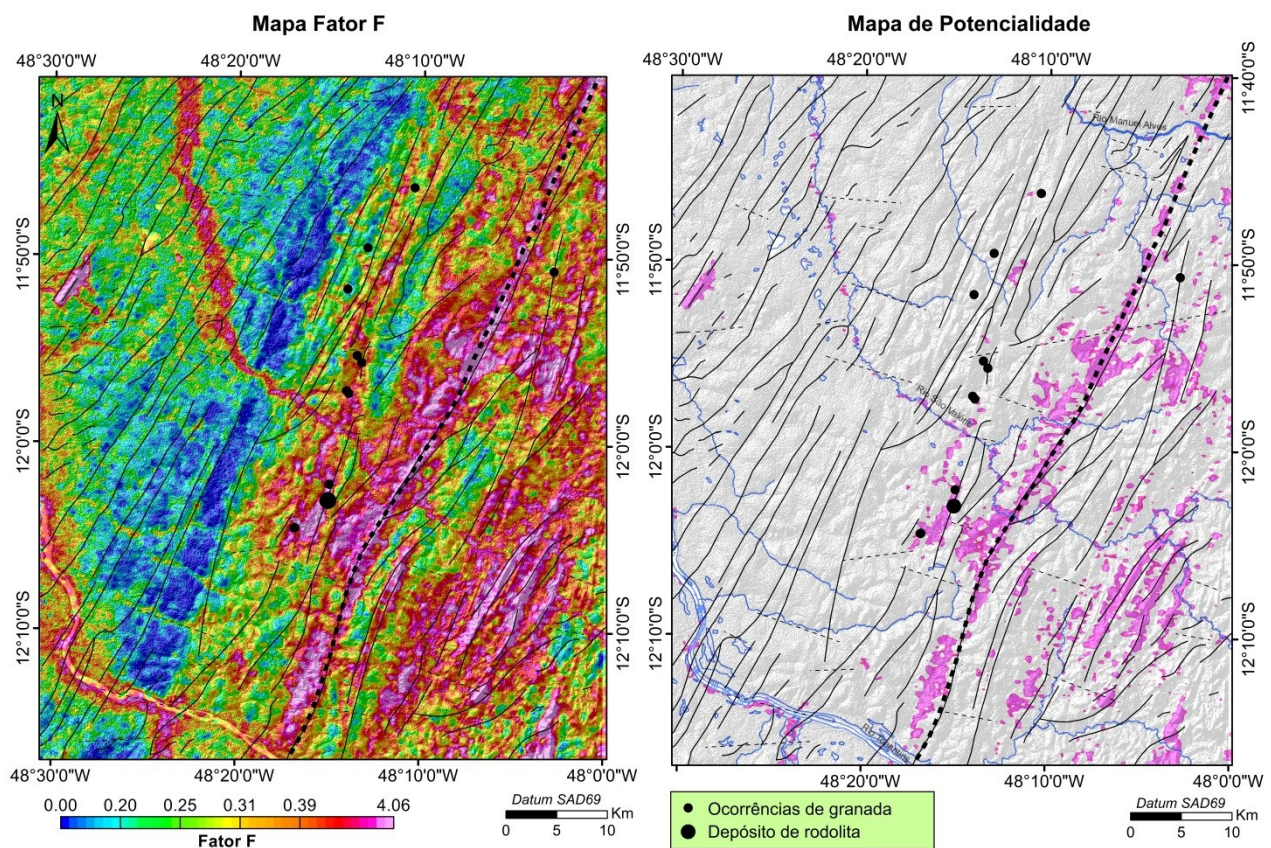
O campo hidrotermal identificado nas imagens gamaespectrométricas permite a sua utilização como vetor prospectivo para granada. A faixa hidrotermal apresenta uma tendência N05-30°E e ocorre na região limite entre os domínios magnéticos-estrutural I e II.

## V CONCLUSÕES E MAPA DE POTENCIALIDADE

A análise das imagens geofísicas de magnetometria e gamaespectrometria aérea permitiu interpretações que avançaram no conhecimento geológico-geofísico sobre as ocorrências de granada na região de São Valério da Natividade, de suma importância para o direcionamento da triagem de locais promissores para novas áreas mineralizadas.

Os produtos geofísicos mostram uma clara relação entre a distribuição das ocorrências e a estruturação do Lineamento Transbrasiliiano. As estruturas mediaram à circulação e acumulação dos fluidos hidrotermais provavelmente responsáveis pelos processos metassomáticos e desenvolvimento da rodolita. O ambiente metalogenético para a granada de São Valério da Natividade também apresenta áreas com enriquecimento de potássio, considerado a principal feição indicadora de áreas potenciais para ocorrência de granada.

A verificação dos locais promissores foi feita através do mapa de potencialidade Fator F obtido através do método de classificação não supervisionada com auxílio do algoritmo ISODATA no INVE. Esse método permitiu separar o que é ou não anômalo dentro da classe de valores do parâmetro F (Figura 5.1).



**Figura 5.1** - Classificação não supervisionada através do algoritmo ISODATA com base na classe de valores da legenda do Fator F.

O mapa de potencialidade resalta os vetores prospectivos, a estrutura magnética regional e o *trend* de ocorrências de granada. A partir do mapa de potencialidade foram selecionados alvos prospectivos dentro da zona de cisalhamento regional e do *trend* que apresentam uma classe de valor de  $K_d$  e outras assinaturas geofísicas similares com as do depósito. As localizações dos alvos são apresentados na Figura 5.2.

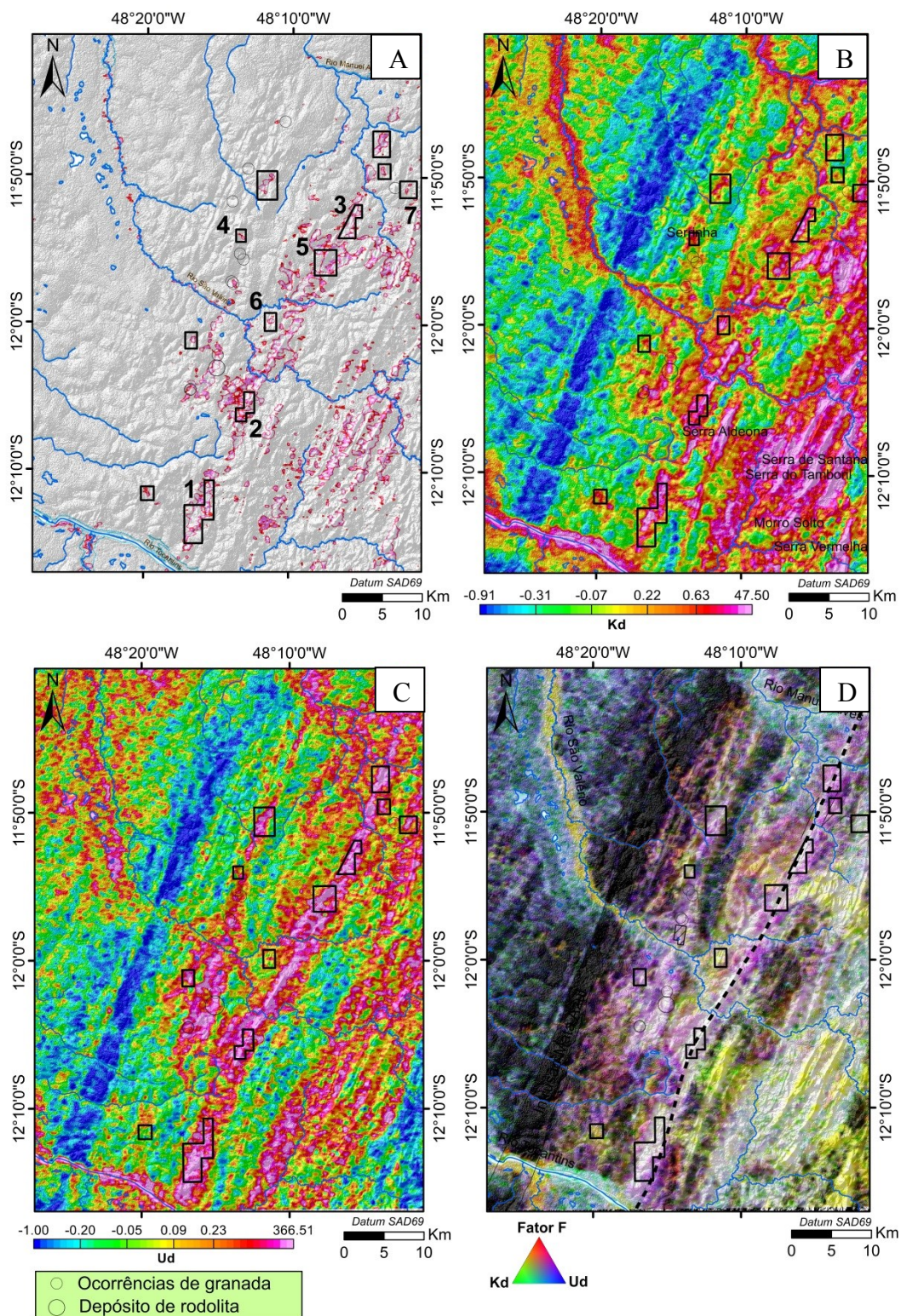
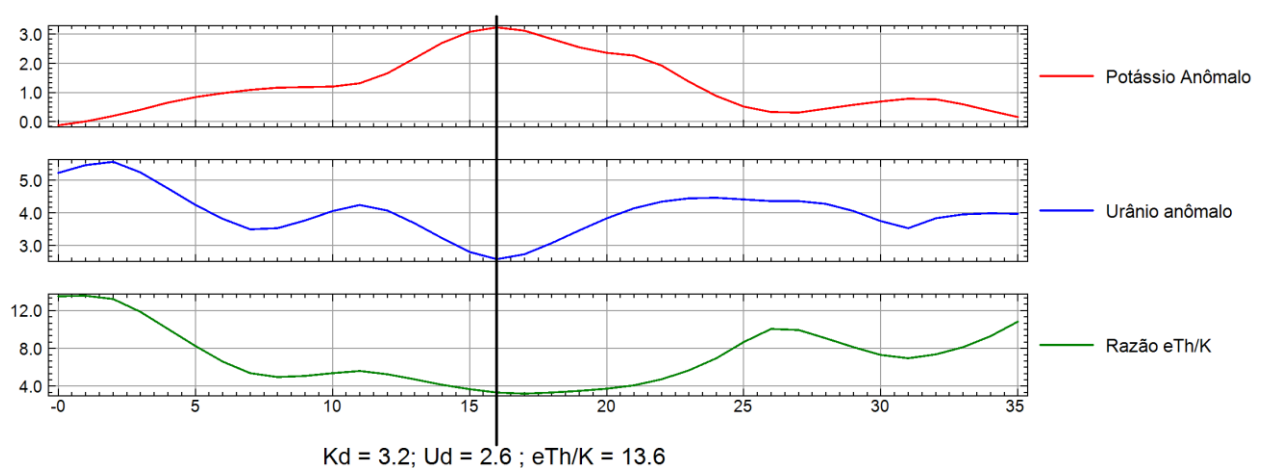


Figura 5.2 - Alvos prospectivos selecionados.

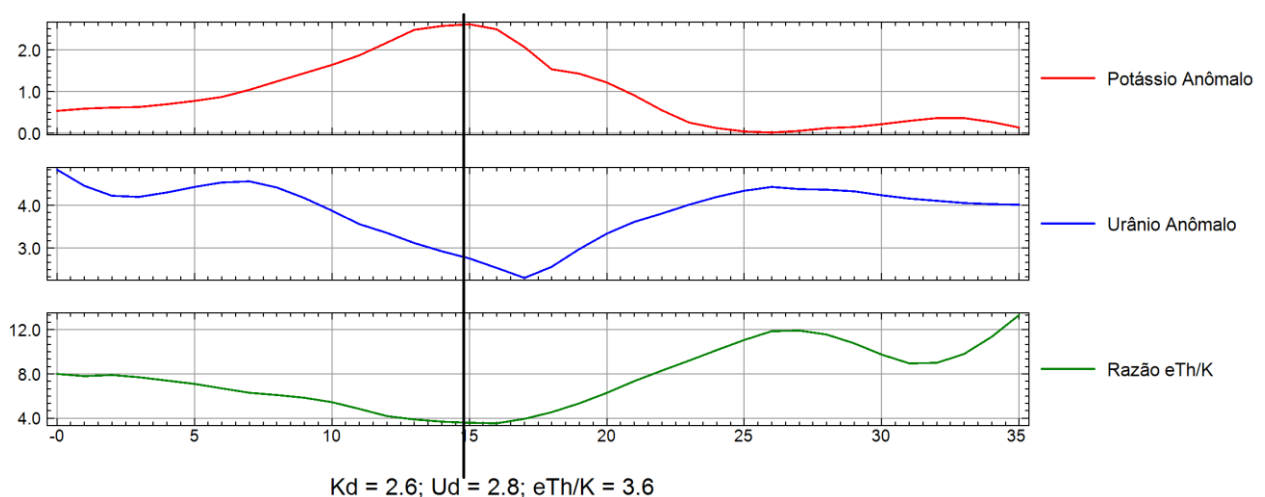


Alguns alvos foram selecionados para análise dos padrões geofísicos. Para análise foram escolhidos alvos com anomalias de  $K_d$  (Figura 5.2-A e B), com anomalia ou não de  $U_d$  (Figura 5.2-C) e associados a respostas que mostram locais de intensa alteração hidrotermal (Figura 5.2-D). Os perfis

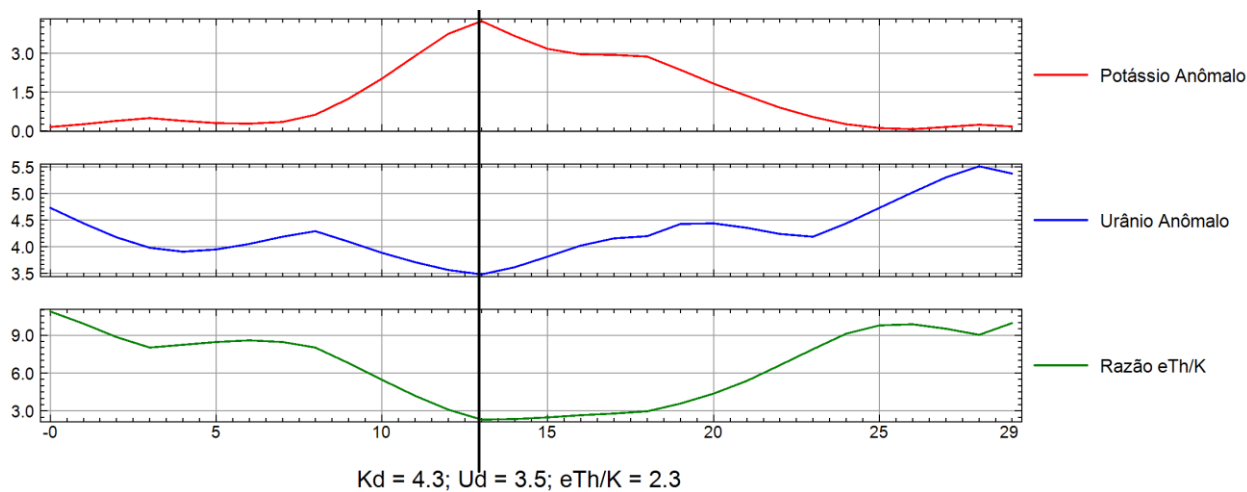
Os perfis geofísicos dos alvos, nomeados numericamente de 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7 (Figura 5.2), foram elaborados no Oasis *Montaj* e são apresentados nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, respectivamente. Foram feitos perfis do potássio anômalo para reconhecimento dos alvos potassificados similares com o da mina ( 4.13 de  $K_d$ ), o do urânio anômalo e a razão eTh/K para o reconhecimento do caráter hidrotermal.



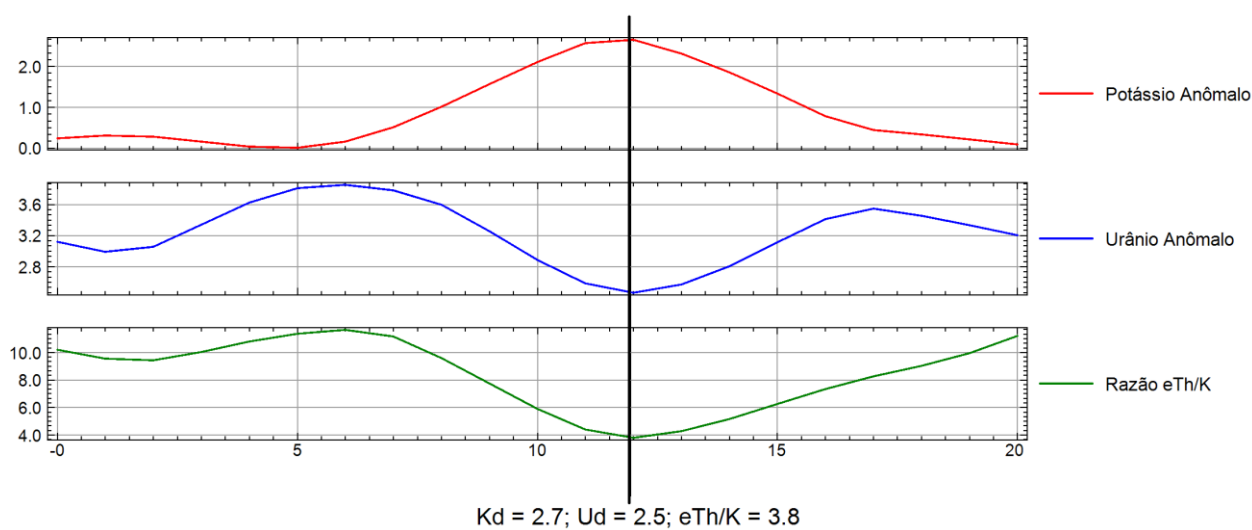
**Figura 5.3 - Perfis geofísicos do Alvo 01.**



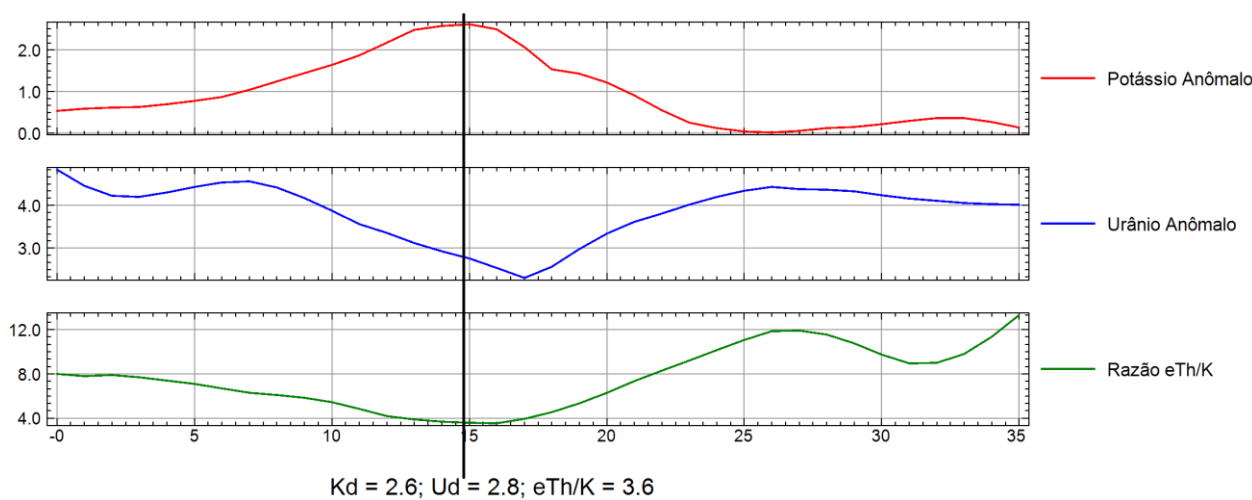
**Figura 5.4 - Perfis geofísicos do Alvo 02.**



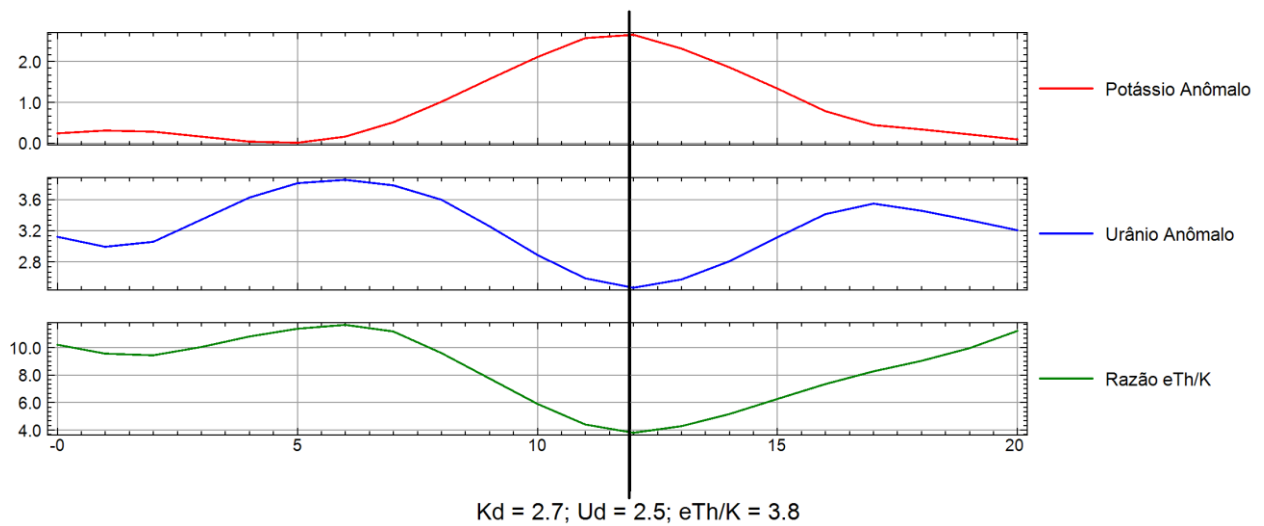
**Figura 5.5 - Perfis geofísicos do Alvo 03.**



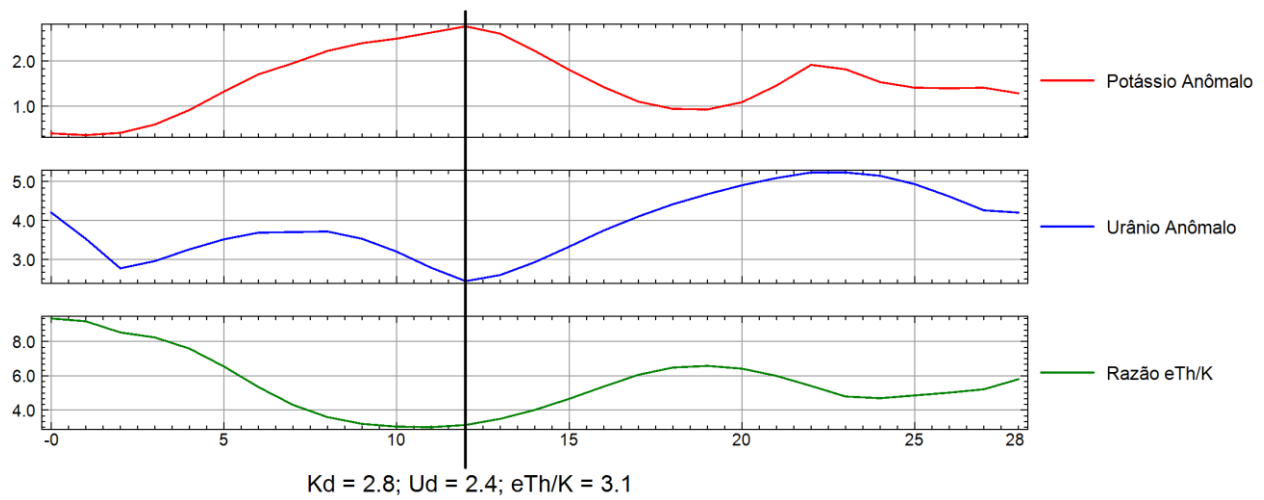
**Figura 5.6 - Perfis geofísicos do Alvo 04.**



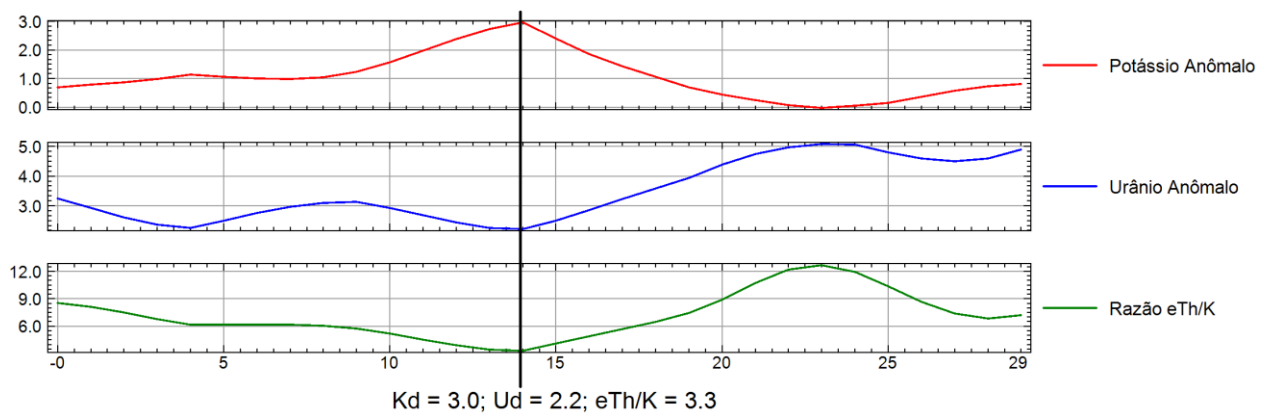
**Figura 5.7 Perfis geofísicos do Alvo 05.**



**Figura 5.8** - Perfis geofísicos do Alvo 06.



**Figura 5.9** - Perfis geofísicos do Alvo 07.



**Figura 5.10** - Perfis geofísicos do Alvo 08.

Para todos os alvos analisados, os perfis mostram baixas razões  $eTh/K$ , que esperava ser altas, com exceção do alvo 1 que apresenta 13.6 e se aproxima mais da assinatura da mina (aproximadamente 15), valores de urânio anômalo maiores que 1,21, sendo o urânio indicador apenas de uma associação hidrotermal e não de minério, e uma variação de 2,6 a 4,3 de K anômalo que quando comparada com os valores dos garimpos Zé Doido e do depósito rodolita (Figura 4.2), sugere uma potencialidade para ocorrência de granada. O alvo 3 apresentou o mesmo valor de K anômalo observado na mina, porém uma baixa razão  $eTh/K$ .

Dentre os alvos, o alvo 1 apresentou padrão geofísico similar com o da mina e a sua localização indica um sítio intensamente hidrotermalizado.

Apesar dos valores de K anômalo indicarem locais promissores para uma possível concentração de granada, os alvos precisam ser checados em campo. Se os resultados forem assertivos, a metodologia prospectiva empregada poderá ser útil para a seleção de novos alvos na Província Gemológica São Valério - Mata Azul.

É importante salientar que as anomalias e os baixos valores de  $K_d$  não são desvinculados de ocorrências de granada, visto que, como exemplo da ocorrência 2 (Figura 4.4), podem apresentar ocorrências com menor potencial mineral ou ocorrências com cristais de granada deformados e intemperizados na superfície.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. DE, Hasui, Y., Neves, B. B. B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews*. 17:291-317.
- Almeida, F. F. M. DE; Hasui, Y., Neves, B. B. B., Fuck, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *In: 8º Simpósio de Geologia do Nordeste*. Campina Grande - PB, SBG, p. 363-391.
- ALMEIDA, F. F. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro: DNPM, 36p. (Boletim n. 241).
- Alvarenga, C. J. S., Botelho, N. F., Dardenne, M. A., Lima, O. N. B., Machado, M.A. 2007. Folha Cavalcante - SD.23-V-C-V, escala 1:100.000: nota explicativa.. Programa geologia do Brasil, Levantamento Geológicos Básicos. Contrato UnB-CPRM. 67p.
- Araújo Filho, J. O. DE. 2000. The Pirineus syntaxis: an example of intersection of two Brasiliano fold-thrust belts in Central Brazil, and its implications for the tectonic evolution of Western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1): p.144-148.
- Araújo Filho, J. O. DE. 1999. Structural Characteristics and Tectonic Evolution of the Pirineus Syntaxis, Central Brazil: Ph.D. Thesis: University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 417p.
- Barbosa O., Batista M. B., Dyer R. L., Braun O. P. G., Soriano C. R., Arruda M. E., Cotta J. C. 1969. Projeto Brasília-Goiás. Relatório Final. Prospec/DNPM. 225p.
- BlaKely, R. J., Simpson, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, 51, 1494-1498.
- Blum, M. L. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação a geologia regional e a prospecção mineral. Tese de doutorado em Geologia, Universidade de Brasília, Brasília-DF. 229p.
- Borges G. M. 2016. Petrografia das Rochas Metamórficas da Região de São Valério da Natividade (TO) e Litoquímica e Geocronologia dos Gnaisses. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá. 60p.
- Botelho N. F., Dantas E. L., Laux J. H., Junges S. L. 2006. The Pleoproterozoic peraluminous Aurumina granite suite, Goiás and Tocantins: whole-rock geochemistry and Sm-Nd isotopic constraints. *In: The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton, Brazil*. IGCP 509, Brazil, p. 9-21.
- Botelho, N. F., Alvarenga, C. J. S., Menezes, P. R., D'El-Rey-Silva L. J. H. 1999. Suíte Aurumina: uma suíte de granitos paleoproterozoicos, peraluminosos e sin-tectônicos na Faixa Brasília. VII Simpósio de Geologia do Centro-Oeste e X Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Brasília. Anais. p.17.
- Cooper, G. R. J.; D. R. Cowan, 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase: *Computers & Geosciences*, 32, no. 10, 1585–1591, doi: 10.1016/j.cageo.2006.02.016.
- Carvalho, J. S. 1987. Aplicação de métodos magnetométricos para a definição do comportamento estrutural da Faixa de Dobramentos Araguaia. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Pará. 170p.
- Cordeiro, P. F. de O., Oliveira, C. G. 2017. The Goiás Massif: Implications for a pre-Columbia

- 2.2–2.0 Ga continent-wide amalgamation cycle in central Brazil. *Precambrian Research*, 298, p. 403-420. Doi:10.1016/j.precamres.2017.06.021
- Cordeiro, P. F. O., Oliveira, C. G., Giustina, M. E. S. D.; Dantas, E. L.; Santos, R.V. 2014. The Paleoproterozoic Campinorte Arc: Tectonic evolution of a Central Brazil pre-Columbia orogeny. *Precambrian Research* 251, p. 49-61.
- Cordell, L.; V. J. S. Grauch, 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, in W. J. Hinze, ed., The utility of regional gravity and magnetic anomalies maps: SEG, 181–197.
- Costa, J. B. S. 1985. Aspectos litoestruturais e evolução crustal da região Centro-Norte de Goiás. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 210p.
- Costa, J. B. S., Hasui, Y. 1988. Aspecto do Lineamento Transbrasiliano na Região de Porto Nacional - Natividade, GO. In: CONGR. BRAS. GEOL., 35, Belém. Anais. Belém, SBG, v.5, p. 2208-2216.
- Cuadros, F. A., Botelho, N.F., Fuck, R. A. Dantas, E. L. 2017. The peraluminous Aurumina Granite Suite in central Brazil: an example of mantle-continental crust interaction in a Paleoproterozoic cordilleran hinterland setting?. *Precambrian Research*. v. 299, p. 75 -100.
- D’el-Rey Silva, J. H., Vasconcelos, M. A. R., Silva, D.V.G., 2008. Timing and role of the Maranhão River Thrust in the evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt and Tocantins Province, Central Brazil. *Gondwana Research*. 13: 352-374.
- Dardenne M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: U.G.Cordani, E.J. Milani, A.Thomaz Filho e D.A. Campos. 2000 (eds). *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263.
- Dickson, B. L., Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): p. 187–200.
- Dipple, G. M., Ferry, J. M. 1992. Metasomatism and fluid flow in ductile fault zones. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112(2-3), p.149–164. doi:10.1007/bf00310451.
- Diretoria de Serviço Geográfico - DSG. 1977. Folha topográfica SC-22-Z-D-VI, Apinajé. Escala 1:100.000.
- Diretoria de Serviço Geográfico - DSG. 1977. Folha topográfica SC-22-X-B-III, Bananal. Escala 1:100.000.
- Dyer, R. C. 1970. Grupo Araí. Um Grupo de metamorfitos do Centro-Leste de Goiás, *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, v. 28.
- Efimov, A. N. 1978. Multiplikativnyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrorniceskim dannym. Naucno-proizvodatvennoje objedinenie “Geofizika” Leningrad.
- Ferreira, F. J., Fruchting, A., Guimarães, G. B., Alves, L. S., Martin, V. M. O., Ulbrich, H. H., 2009. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados II: O exemplo do Granito Joaquim Murtinho, Complexo Granítico Cunhaporanga, Paraná. *Geologia USP. Série Científica*, 9(1): 55-72.
- Ferreira, F. J.; de Souza, J.; de B. e S. Bongiolo, A.; de Castro, L. G.; Romeiro M.A.T. 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I: Aplicação a dados sintéticos. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, SBGf Brasília, Anais, 1-6.
- Ferreira, F. J.; de Souza, J.; de B. e S. Bongiolo, A., & de Castro, L. G. 2013. Enhancement of

- the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, 78 (3), J33-J41.
- Fonseca, M. A., Dardenne, M. A., Uhlein, A. 1995. Faixa Brasília setor setentrional: estilos estruturais e arcabouço tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*. 25(4): p. 267-278.
- Fonseca, M. A. 1996. Estilos estruturais e o arcabouço tectônico do segmento setentrional da Faixa Brasília. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 171p.
- Fonseca, M. A., Dardenne, M. A. 1993. Sistemas de falhamentos transcorrentes na porção norte da Faixa Brasília. In: SIMP. SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador. Anais. Salvador, SBG, p.280-282
- Fonseca, M. A., Dardenne, M. A. 1996. Arcabouço estrutural e evolução cinemática da Faixa Brasília em seu segmento setentrional. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 39, Salvador, 1996. Anais. Salvador, SBG, 6: p.98-101.
- Frasca, A. A. S, Lima, H. B. A, Araújo, E. S., Bispo, P. R. S., Assis J. R., Pereira, C. L., Silva, V. P. 2011. Carta Geológica folha SC-22-Z-D Gurupi. Escala 1:250.000, Serviço Geológico do Brasil-CPRM.
- Frasca, A. A. S, Ribeiro, P. S. E. 2017. Carta Geológico-Geofísica folha SD-22-X-B-III Bananal. Escala 1:100.000, Serviço Geológico do Brasil-CPRM.
- Frasca, A. A. S, Moraes, L. L., Villasboas, P. F. 2006. Província Gemológica São Valério da Natividade-Mata Azul. Controle, relação estrutural e geocronologia das mineralizações. XLIII Congresso Brasileiro de Geologia.
- Fuck, R. A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. In: SIMP. GEOL. CENTROOESTE, 4, Brasília, 1994. Anais. Brasília, SBG, p. 184-187.
- Fuck, R. A., Dantas, E. L., Vidotti, R. M., Roig, H. L., Almeida, T. 2013. Deformação intracontinental em sistemas transcorrentes: o caso do lineamento transbrasiliano: geometria, idade e significado. In: XIV Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos (SNET), 1, Resumos.
- Fuck, R. A., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Botelho, N. F., Armstrong, R., Laux, J. H, Junges, S. L., Soares, J. E., Praxedes, I. F., 2014. Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, 244: 53-74.
- Galbraith J. H., Saunders D. F. 1983. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 18: p. 49-73.
- Gerken, J. C. D'A. 1989. Foundation of Exploration Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, 25. *Elsevier*, Amsterdam.
- Giustina M. E. S. D., Oliveira C. G., Pimentel M. M., Melo L. V., Fuck R. A., Dantas E. L., Buhn B., 2009. U–Pb and Sm–Nd constraints on the nature of the Campinorte Sequence and related Paleoproterozoic juvenile orthogneisses, Tocantins Province, Central Brazil. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 323, p.255–269.
- Gnojek, I., Prichystal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, n. 23, p.491-502.
- Gorski, M. S., Rodi, N. M. 1993. Unusual new garnets from Brazil. *Letters, Gems and Gemology* 29(4): p.227.
- Grew, E. S., Locock, A. J., Mills, S. J., Galuskina, I. O., Galuskina, E. V., Halenius, U., 2013. Nomenclature of the garnet supergroup. *American Mineralogist* 98, p.785–811.
- Gunn, P. J., Dentith, M. C. 1997. Magnetic responses associated with mineral deposits. *AGSO*

- Journal* 17(2): p. 145-158.
- Hasui, Y., Bartorelli, A., Mortari, D., Ribeiro, A.C.O., Jácomo, A.A.C. 1987. Considerações sobre a geologia da região de Porto Nacional e Ipueiras, GO. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 295-301.
- Hidden, W. E. and Pratt, J. H., 1898. On Rhodolite, a new variety of garnet. *American Journal of Science*, Volume 28, p. 294-296.
- Hobbs, W. H. 1912, Earth features and their meaning: New York, Macmillan Co., 506 p.
- Hobbs, W. H., 1904, Lineaments of the Atlantic border region: Geol. Soc. America Bull., v. 15, p. 483-506.
- Hoover, D. B.; Karfunkel J.; Krambrock K.; and Fernandes, A. F. 2015. An Unusual Color-Change Almandine from Fazenda Rodolita, Tocantins State, Brazil. *The official journal of The Gemmological Association of Australia*. Volume 25, N°10. p. 337 – 346.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Austria, 173p.
- Jost, H., Chemale Jr., F., Fuck, R. A., Dussin, I. A., 2013. Uvá Complex, the oldest orthogneiss of the Archean-Paleoproterozoic terrane of central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 47, p. 201-212.
- Kitajima L. F. W. 2002. Mineralogia e Petrologia do Complexo Alcalino de Peixe-Tocantins. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Krambrock, K. Guimarães, F. S. Pinheiro, M. V. B. Paniago, R., Righi, A, Persiano A. I. C. Karfunkel, J.; Hoover D.B. 2013. Purplish-red almandine garnets with alexandrite-like effect: causes of color and color-enhancing treatments: *Phys. Chem. Minerals*, Vol. 40, p.555-562.
- Krippner A., Meinhold, G., Morton, A. C., Evnatten H. V, 2014. Evaluation of garnet discrimination diagrams using geochemical data of garnets derived from various host rocks. *Sedimentary Geology* 306, p. 36-52.
- Li, X., 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71(2):13-16.
- Li, X., 2008. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge* 27, p. 990-1002.
- Luiz, J. G., Silva, L. M. C. 1995. Geofísica de Prospecção. Belém. Universidade Federal do Pará, V. 1, 311p.
- Marini, O. J., Fuck, R. A., Figueiredo, A. N. 1976. Projeto São Félix: Relatório Final. Convênio FUB/ELETRONORTE, Brasília. 125p.
- Marini, O. J., Liberal, G. S., Dos Reis, L. T., Trindade, C. A. H., De Souza, S. L. 1978. Nova unidade litoestratigráfica do Pré-Cambriano do estado de Goiás. XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife. Boletim N°1, Resumos. p. 126-127.
- Marques G. C. 2009. Geologia dos Grupos Araí e Serra da Mesa e seu embasamento no sul do Tocantins. Dissertação de Mestrado (UnB), Brasília-DF, 122p.
- Martins-Ferreira, M. A. C. 2017. Evolução Tectônica das Bacias Araí, Traíras e Paranoá na Faixa Brasília Norte. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Martins-Ferreira, M. A. C., Dias, A.N.C., Chemale, F. Campos, J.E.G. 2018. Proterozoic intracontinental basin succession in the western margin of the São Francisco Craton: Constraints from detrital zircon geochronology. *Journal of South America Earth Sciences*, 81: p.165-176.



- Miller, H. G., Singh, V. 1994. Potential field tilt – A new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, v. 32, p. 213-217. doi: 10.1016/0926-9851(94)90022-1
- Milligan, P. R., Gunn, P. J. 1997. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *Journal of Australian Geology e Geophysics*, 17(2) p. 63-75.
- Minty B. R. S. 1997. Fundamentals of Airborne Gamma-Ray Spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology e Geophysics*, 17: p.39-50.
- Nabighian, M. N. 1972. The analytical signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, p. 507-517. doi: 10.1190/1.1440276.
- O’leary, D. W., Friedman, J. D., e Pohn, H. A. 1976. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(10), 1463. doi:10.1130/0016-7606(1976)87<1463:lllspn>2.0.co;2
- Ostrovskiy, E., Ya., 1973. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. *International Geology Review*, 17, p. 461-468. doi:10.1080/00206817509471687.
- Padilha A. L., Vitorello I., Pádua M. B., 2013. Deep conductivity structure beneath the northern Brasília belt, central Brazil: Evidence for a Neoproterozoic arc-continent collision. *Gondwana Research*, 23:748-758
- Patranabis-Deb, S., Schieber, J., Basu, A., 2008. Almandine garnet phenocrysts in a ~ 1 Ga rhyolitic tuff from central India. *Geological Magazine* 146 (1): p.133-143.
- Pimentel, M. M. 1991. Late Crustal Evolution of the Tocantins Province in Central Brasil: an isotopic and geochemical study. PhD Thesis, University of Oxford. 250p.
- Pimentel, M. M., Fuck, R. A. 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, 20: p.375-379.
- Pimentel, M. M. 2015. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach *Brazilian Journal of Geology*, 46, p. 67-82.
- Pimentel, M. M., Fuck, R. A., Ferreira Filho, C.F., Araújo, S.M. 2000. The basement of the Brasília Belt and the Goiás Magmatic Arc. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. (eds) *Tectonic Evolution of South America*. 31<sup>st</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 195-229.
- Pires, A. C. B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev. Bras. Geoc.*, 25 (1): p.61-68.
- Praxedes, F. I. 2015. Lineamento Transbrasiliano, contribuição aerogeofísica, tectônica e Geocronológica no setor nordeste da Faixa Brasília. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília. Brasília-DF. 106p.
- Reis, L. C. K. O. 2016. Arcabouço tectônico da porção centro-norte da Faixa Brasília com base em dados magnéticos e gravimétricos. Dissertação de Mestrado (UnB), Brasília-DF, 72p.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York. Chichester: p.682-749.
- Saunders, D. F, Terry, S. A., Thompson, C. K. 1987. Test of national uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics*, 52, nº11, p.1547–1556.
- Schobbenhaus C., Ribeiro C.L., Oliva L.A., Takanohashi J.T., Lindenmayer Z.G., Vasconcelos

- J.B., Orlandi V. 1975. Carta Geológica do Brasil Milionésimo. Folha Goiás SD.22. Texto Explicativo. Brasília, DNPM.
- Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 006. Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Projeto Aerogeofísico Tocantins, 479p.
- Shieves R. B. K., Charbonneau B.W., Ford. K. L. 1997. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry-recognition of alteration related to mineralization. In Proceedings of Exporation 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Edited by A. G. G. Gugins, p.741-752.
- Shieves, R. B. K., Charbonneau, B. W., Ford, K. L. 2000. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry-recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, v. 65, n. 6, p. 2001–2011. Society of Exploration Geophysicists.
- Silva, A. M., Oliveira, C. G. DE, Marques, G. C., Pires, A. C. B. 2007. Relationship between airborne geophysical signatures and hydrothermal rocks with Cu-Au mineralization in the Mara Rosa Magmatic Arc, Central Brazil. 10<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil.
- Simonet C., Okundi S., Masai P. 2002. General setting of coloured gemstone deposits in the Mozambique Belt of Kenya Preliminary considerations.
- Soares, J. E. P., Berrocal, J. A., Fuck, R. A., Mooney, W. D., Ventura, D. B. R. 2006. Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. *Journal of Geophysical Research*.
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, nº 2, 35: p. 293-302.
- Spector, A., Parker, W. 1979. Computer compilation and interpretation of geophysical data. Geophysics and Geochemistry in the search for metallic ores. Geological survey Canada, *Economic Geology Report*, 31: p.527-544.
- Strieder, A. J., Gottardo, E.; Cunha F. S. S., Binotto, R. B., Mesquisata, M. J. M. 1994. O significado tectônico dos Lineamentos Transbrasilianos no processo colisional Neoproterozóico da Província Estrutural do Tocantins: uma hipótese de trabalho. In: CONGR. BRAS. GEOL., 38, Balneário Camboriú, 1994. Bol. Res. Exp. Camboriú, SBG, p.267- 269.
- Tanizaki, M. L. N., Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. 2015. Estratigrafia do Grupo Araí: Registro de rifteamento paleoproterozóico no Brasil Central. *Brazilian Journal of Geology*, 45(1): p. 95-108.
- Telford, W. M., Geldart L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A. 1981. Applied Geophysics Cambridge University Press, New York, 860p.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keys, D. A. 1976. Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Telford, W. M., Gelfart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. A. 1990. Applied geophysics. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 860p.
- Tilling, R. I., Gottfried, D. 1969. Distribution of thorium, uranium, and potassium in igneous rocks of the boulder batholith region, Montana, and its bearing on radiogenic heat production and heat flow. U.S .GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 614-E
- Uhlein, A., Fonseca, M. A., Seer, H. J., Dardenne, M. A. 2012. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília - Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*, 2(12): p.1-14.

- Vasconcelos, R. M., Metelo, J. M., Mota C. A., Gomes D. R. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos. Rio de Janeiro, DIGEOF-CPRM. 172p.
- Ventura, D. B. R., Soares, J. E. P., Fuck, R. A., Caridade, L. C. C., 2011. Caracterização sísmica e gravimétrica da litosfera sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, Província Tocantins, Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências* 41(1): p.130-140.
- Verduzco, B., J. D. Fairhead, C. M. Green, and C. Mackenzie, 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping: The Leading Edge, 23: 116–119. doi: 10.1190/1.1651454.
- Weiherrmann, J. D., Ferreira, F. J. F, Cury, L. F., da Silveira, C. T. 2016. Gamma-ray spectrometry of granitic suites of the Paranagua Terrane, Southern Brazil, *Journal of Applied Geophysics*. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.06.017.
- Wegener, R., Ramos de Brito A., Karfunkel, J., Henn, U., Lind, T. 1998. Granate aus der Umgebung Von São Valério, Tocantins, Brasilien. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, 47:147-152.
- Whitfield, J. M., Rogers, J. J. W., Adams, J. A. S. 1959. The relationship between the petrology and thorium and uranium contents of some granite rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 17, p. 248-271.
- Winchell, A. N. 1933. Elements of Optical Mineralogy, Part II, Descriptions of Minerals, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley, New York.