



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*Metodologia geofísica para discriminação  
de corpos intrusivos na Província Alcalina  
do Alto Paranaíba – MG*

**Leandro Guimarães da Silva**

**Dissertação de Mestrado N° 215**

Brasília – DF

2006



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

*Metodologia geofísica para discriminação  
de corpos intrusivos na Província Alcalina  
do Alto Paranaíba - MG*

**Dissertação de Mestrado**

**Leandro Guimarães da Silva**

ORIENTADOR: **Dr. Augusto César Bittencourt Pires (UnB)**

EXAMINADORES: **Dra. Adalene Moreira Silva (UnB)**

**Dr. Darcy Pedro Svisero (USP)**

Brasília – DF

Dezembro/2006

**Resumo e *Abstract***

---

## RESUMO

A região de Coromandel é conhecida mundialmente pela extração de diamantes. Também apresenta grande quantidade de intrusões ultramáficas alcalinas, que fazem parte da Província Alcalina do Alto Paranaíba (PAAP).

Geologicamente, a área se encontra na borda oeste do Cráton São Francisco, ambiente favorável para a presença de mineralizações primárias de diamante. As rochas da região pertencem à Faixa de Dobramentos Brasília, sendo principalmente metassedimentos de baixo grau depositados durante o proterozóico e deformados pelo Ciclo Brasileiro. Tais unidades formam o embasamento de unidades fanerozóicas, representadas pelas rochas das bacias San-Franciscana e do Paraná.

Estima-se que 85% dos corpos intrusivos da região de Coromandel-MG sejam kamafugíticos, enquanto os kimberlitos – uma das conhecidas fontes primárias de diamante – representem apenas 15% das intrusões.

A partir de dados aerogeofísicos adquiridos em linhas de vôo espaçadas de 250 metros, foi possível identificar as anomalias magnéticas e gamaespectrométricas geradas pelos corpos intrusivos. Foi desenvolvido um procedimento estatístico para discriminação entre corpos kimberlíticos e kamafugíticos da PAAP, com o objetivo de aperfeiçoar a prospecção de alvos primários de diamante.

Quatro dentre seis corpos estudados por Araujo (2000) foram analisados por meio de visualizações tridimensionais, bem como os 54 corpos indicados na Folha SE-23 (CPRM, 2004). Desta forma, as características geofísicas dos 17 corpos, identificadas por meio de classificação não-supervisionada, geram dois grupos: o dos kimberlitos e o dos kamafugitos. O resultado desta classificação serviu como entrada de dados para a definição de uma função discriminante entre os dois grupos.

Novas anomalias foram identificadas por dois métodos – um apenas visual e outro usando um algoritmo – e formaram dois grupos de amostras, que, a partir da técnica de Análise Discriminante, foram classificadas em kimberlitos e kamafugitos. Outros corpos conhecidos dentro da área também foram amostrados e classificados.

O procedimento discriminou novos corpos, classificados como kamafugitos, na sua maioria, confirmando sua eficiência. Apesar disso, se faz necessário o refinamento dos métodos aqui utilizados, para aprimoramento dos resultados.

## **ABSTRACT**

The Coromandel region is worldwide known for its large diamond exploration. Several ultramafic alkaline intrusions belonging to the Alto Parnaíba Igneous Province (APIP) are also found there.

This region is on the western border of São Francisco Craton, which is a favorable site to find kimberlites, primary source of diamonds. Proterozoic metasediments belonging to the Brasília Thrust and Fold Belt shows low-grade metamorphism, due to the Brasiliano Orogenic Cycle. These unities are the basement of the fanerozoic sedimentary rocks of Sanfranciscana and Parana basins.

An shallow estimative of the APIP intrusions shows that 85% are kamafugitic bodies and only 15% are true kimberlites, the main primary diamond source.

Magnetic and gamma-ray anomalies due to ultramafic intrusions were identified from 250m line-spaced airborne geophysical data and a statistical proceeding was created to discriminate kamafugitic and kimberlitic bodies in APIP. The goal of this proceeding is to optimize the primary diamond source targeting.

Three-dimensional views were created to analyze the anomalies of 6 bodies studied by Araujo (2000), as well as 54 bodies indicated in the SE-23 sheet (CPRM, 2004). Seventeen bodies were selected and classified by unsupervised classification that separates two geophysical characteristic groups: the kimberlites and the kamafugites. A Discrimination Function between the two groups generated by the results of unsupervised classification, used as input data.

Two methods – an algorithm-based and a visual-based – detected new geophysical anomalies that were classified in kimberlite-type and kamafugite-type by Discriminant Analysis, as well as other known bodies within the study area.

The proposed proceeding identified new similar anomalies that may be interpreted as intrusive bodies of kimberlite or kamafugite signatures. Field checking, geochemical analysis and petrographical studies are needed to enhance and refine the proceeding.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço ao Prof. Augusto Pires que, com muita paciência e sabedoria, soube resolver de forma simples os problemas que surgiram durante todo o período do mestrado.

Ao Prof. Roberto de Moraes, por nos ensinar a importância do conhecimento aprofundado e detalhado das diversas atividades nas quais trabalhamos.

À minha família, sempre presente nos momentos mais alegres e apoiando naqueles mais difíceis.

Ao CNPq, pelo financiamento de parte das atividades aqui envolvidas, à Universidade de Brasília e ao Instituto de Geociências pelo apoio, incentivo e estrutura disponibilizada e aos professores do IG pelo grande conhecimento transmitido.

À empresa HGeo | InterGeo – Tecnologia e Informação em Geociências, pelo total e irrestrito apoio para a realização deste projeto.

Aos amigos Heitor Franco e Gustavo Mello, pelas boas idéias e conselhos de pessoas com grande experiência e conhecimento na área de geofísica.

Ao amigo Henrique Roig, com o qual muito aprendi durante o tempo em que trabalhamos juntos.

Às professoras Edi Mendes e Teresa Brod, pelas revisões e inestimáveis sugestões para a redação do texto.

Aos amigos da HGeo|InterGeo pelas grandes ajudas, às vezes emergenciais, inclusive *via* internet. Carol Prescott, Chris, Aline Anjos, Aline Tavares, Santino, Loiane, Thiago Lango, Rodrigo Franco, Mônica, Rômulo, Saulo, Maria Cristina e Eline: muito obrigado!

A todos os colegas de mestrado, especialmente à Lys, grande amiga e exemplo de pessoa, e ao Magno Augusto, pelas risadas e apoio mútuo.

Às ex-bolsistas e amigas Lara Nigro e Aline Tavares pela dedicação e grande contribuição nos trabalhos fundamentais da dissertação.

E a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a elaboração desta dissertação.

## Índice

---

<b>RESUMO E ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – Localização da Área de Estudo .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2: CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 – Faixa Brasília .....</b>	<b>5</b>
2.1.1 – Segmento Norte .....	6
2.1.1.1 – Grupo Araí .....	7
2.1.1.2 – Grupo Paranoá .....	7
2.1.2 – Segmento Sul .....	8
2.1.2.1 – Grupo Vazante .....	8
2.1.2.2 – Grupo Canastra .....	8
2.1.2.3 – Grupo Ibiá .....	10
2.1.2.4 – Grupo Araxá .....	11
2.1.2.5 – Grupo Bambuí .....	12
<b>2.2 – Bacia San-Franciscana .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 – Grupo Santa Fé .....	13



2.2.2 – Grupo Areado .....	17
2.2.3 – Grupo Mata da Corda .....	17
2.2.4 – Província Alcalina do Alto Paranaíba.....	17

## **CAPÍTULO 3: KIMBERLITOS.....1**

### **3. KIMBERLITOS .....21**

#### **3.1 - Formas de Ocorrência de Kimberlitos ..... 21**

#### **3.2 – Classificação Petrológica de Rochas Kimberlíticas ..... 23**

##### 3.2.1 - Kimberlitos ..... 24

##### 3.2.2 - Orangeitos ..... 24

##### 3.2.3 - Lamproítos..... 25

##### 3.2.4 - Lamprófiros ..... 26

##### 3.2.5 - Kamafugitos ..... 26

#### **3.3 - Kimberlitos na Região de Coromandel ..... 27**

#### **3.4 – Métodos de Prospecção de Kimberlitos..... 29**

## **CAPÍTULO 4: MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS**

.....1

### **4. MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS .....31**

#### **4.1 Dados de Aerogeofísica..... 31**

##### 4.1.1 Processamento ..... 33

###### 4.1.1.1 – Pré-Processamento..... 33

###### 4.1.1.2 – Análise de Consistência e Interpolação ..... 34

###### 4.1.1.2 – Micronivelamento..... 34

##### 4.1.2 – Produtos Gerados..... 35

###### 4.1.2.1 – Gamaespectrometria ..... 35

###### 4.1.2.2 Magnetometria ..... 36

##### 4.1.3 Análise dos Produtos Aerogeofísicos ..... 36

###### 4.1.3.1 Gamaespectrometria ..... 36

4.1.3.2 Magnetometria .....	38
<b>4.3 – Identificação de Anomalias Magnéticas .....</b>	<b>39</b>
4.3.1 – Detecção visual .....	39
4.3.2 – Detecção Automática .....	40
<b>4.4 – Análise Estatística .....</b>	<b>42</b>
4.4.1 – Preparação dos Produtos .....	42
4.4.2 – Análise de Grupos (Médias-K) .....	43
4.4.3 – Análise Discriminante .....	44
<b>4.2 Geofísica Terrestre .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Aplicativos Utilizados .....</b>	<b>46</b>
<b>CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA .....</b>	<b>1</b>
<b>5. CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1 Classificação de Kimberlitos e Rochas Associadas .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2 Caracterização Geofísica dos Alvos .....</b>	<b>49</b>
5.2.1 – Magnetometria .....	49
5.2.2 – Gamaespectrometria .....	51
<b>5.3 Classificação de Intrusões e Anomalias .....</b>	<b>55</b>
5.3.1 Classificação por Médias-K .....	55
5.3.2 Análise Discriminante .....	57
5.3.2.1 Seleção Visual de Anomalias Magnéticas .....	57
5.3.2.2 Seleção Automática de Anomalias Magnéticas .....	61
5.3.2.3 Análise dos Resultados .....	65
<b>5.4 Considerações Sobre a Integração dos Dados .....</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>1</b>
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>69</b>

<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>1</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO I: PRODUTOS GERADOS .....</b>	<b>1</b>
<b>A1 ANEXO I: PRODUTOS GERADOS .....</b>	<b>I</b>
<b>A1.1 – Produtos de Magnetometria .....</b>	<b>i</b>
<b>A1.2 – Produtos de Gamaespectrometria.....</b>	<b>iv</b>
<b>ANEXO II: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....</b>	<b>1</b>
<b>A2 ANEXO II: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>A2.1 - Magnetometria.....</b>	<b>xii</b>
<b>A2.2 Gamaespectrometria .....</b>	<b>xvii</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. (MODIFICADO DE IBGE, 2005).....	3
FIGURA 2.1: MAPA GEOLÓGICO E POSICIONAMENTO ESTRATIGRÁFICO DAS UNIDADES PROTEROZÓICAS DA FAIXA DE DOBRAMENTOS BRASÍLIA. A ÁREA DE ESTUDO (AZUL) É PARTE DA ÁREA 1 DO AEROLEVANTAMENTO DA COMIG (VERMELHO). MODIFICADO DE MARINI <i>ET AL.</i> (1981) E FUCK, (1994).....	6
FIGURA 2.2: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA DO GRUPO VAZANTE E SUA RELAÇÃO COM O GRUPO CANASTRA, SEGUNDO DARDENNE (2001). ...	9
FIGURA 2.3: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA MOSTRANDO AS RELAÇÕES DE CONTATO ENTRE OS GRUPOS CANASTRA, IBIÁ E ARAXÁ. (MODIFICADO DE SEER, 1999).....	11
FIGURA 2.4: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA DO GRUPO BAMBUÍ. (GUIMARÃES, 1997).....	12
FIGURA 2.5: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA DA BACIA SANFRANCISCANA. (CAMPOS & DARDENNE, 1997A).....	15
FIGURA 2.6: MAPA DA BACIA SANFRANCISCANA E SEU EMBASAMENTO (CAMPOS & DARDENNE, 1997A). ....	16
FIGURA 2.7: MAPA DO ALTO PARANAÍBA E SUAS PRINCIPAIS FEIÇÕES TECTONO-MAGMÁTICAS (FLEISCHER, 1998).....	18
FIGURA 3.1: MODELO CRUSTAL PARA AMBIENTE DE FORMAÇÃO DE DIAMANTES, MOSTRANDO A LINHA DE ESTABILIDADE ENTRE DIAMANTE E GRAFITA. K: KIMBERLITO; O: ORANGEÍTO; L: LAMPROÍTO; M: MELILITO; N: NEFELINOS E CARBONATITOS. MODIF. MITCHELL (1995). ....	21
FIGURA 3.2: MORFOLOGIA ESQUEMÁTICA DE UM CORPO KIMBERLÍTICO. MODIFICADO DE MITCHELL (1986). ....	22
FIGURA 3.3: CLASSIFICAÇÃO MODAL DOS KAMAFUGITOS, ADAPTADO DE SAHAMA (1974). ....	27
FIGURA 3.4: LEVANTAMENTO SÍSMICO NA REGIÃO DE PATROCÍNIO-MG: ACIMA, MAPA GEOLÓGICO COM A LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS; ABAIXO, PERFIL MODELADO DAS SEÇÕES (MODIFICADO DE PEROSI & BERROCAL, 2003). ....	28

FIGURA 4.1: LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DO LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO DA COMIG (EXTRAÍDO DA ANTIGA PÁGINA ELETRÔNICA DA COMIG).....	32
FIGURA 4.2: HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DO CANAL DE K.....	37
FIGURA 4.3: HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DO CANAL DE TH.....	37
FIGURA 4.4: HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DO CANAL DE U.....	38
FIGURA 4.5: HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DA ASA.....	38
FIGURA 4.6: LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS DE MAGNETOMETRIA TERRESTRE REALIZADOS SOBRE OS 6 CORPOS ESTUDADOS POR ARAUJO (2000).	45
FIGURA 4.7: PERFIS DE MAGNETOMETRIA TERRESTRE: (A) KIMBERLITO ECHO-03; (B) KIMBERLITO DELTA-01.....	46
FIGURA 5.1: PRODUTOS DE MAGNETOMETRIA MAIS RELEVANTES PARA O ESTUDO: AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA) E CAMPO MAGNÉTICO ANÔMALO (CMA).....	50
FIGURA 5.2: ANOMALIA MAGNÉTICA GERADA PELO KAMAFUGITO LIMPEZA-10. (A) NA IMAGEM DO CMA, O EIXO DA ANOMALIA ESTÁ INCLINADO E O PÓLO NORTE É MAIOR QUE O SUL; (B) A MESMA ANOMALIA NA IMAGEM DA ASA. DETALHES NO TEXTO.....	51
FIGURA 5.3: OS CANAIS U E TH SÃO OS MAIS RELEVANTES NO ESTUDO..	52
FIGURA 5.4: VISUALIZAÇÃO EM PERSPECTIVA TRIDIMENSIONAL DAS IMAGENS DO MDT, DOS CANAIS K, TH E U, E DA ASA SOBRE O KAMAFUGITO LIMPEZA-06. ESCALA APROXIMADA.....	53
FIGURA 5.5: ANOMALIA GAMAESPECTROMÉTRICA PERTURBADA NO KIMBERLITO ECHO-03.....	54
FIGURA 5.6: INFLUÊNCIA TOPOGRÁFICA NA ASSINATURA GAMAESPECTROMÉTRICA. O KIMBERLITO ECHO-03 ENCONTRA-SE PRÓXIMO A UMA DRENAGEM, ENQUANTO O CORPO LIMPEZA-20 ESTÁ EM COTA MAIS ELEVADA.....	54
FIGURA 5.7: GRÁFICO DE DISPERSÃO DE TEORES NORMALIZADOS DE ETH E EU PARA OS CORPOS CLASSIFICADOS POR MÉDIAS-K.....	56

FIGURA 5.8: RESULTADO DA ANÁLISE DISCRIMINANTE PARA ANOMALIAS MAGNÉTICAS DETECTADAS VISUALMENTE. ....	59
FIGURA 5.9: ALVO KAMAFUGÍTICO IDENTIFICADO A PARTIR DE ANOMALIA SELECIONADA PELO MÉTODO VISUAL.....	60
FIGURA 5.10: ANOMALIA MAGNÉTICA DE CORPO KIMBERLÍTICO OBLITERADA POR ANOMALIAS ADJACENTES. OBSERVAR QUE AS ANOMALIAS GAMAESPECTROMÉTRICAS SÃO EXPRESSIVAS. ....	61
FIGURA 5.11: <i>BUFFERS</i> DE 50M CRIADOS A PARTIR DAS SOLUÇÕES DO MÉTODO AUTOMÁTICO E PLOTADOS SOBRE A IMAGEM DA ASA EM UMA PARTE DA ÁREA DE ESTUDO. ....	62
FIGURA 5.12: LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS CENTRÓIDES DOS AGRUPAMENTOS DETECTADOS PARA AS ANOMALIAS MAGNÉTICAS, A PARTIR DE UM ALGORITMO (GEOSOFT, 2003).....	63
FIGURA 5.13: IDENTIFICAÇÃO COINCIDENTE DE ALVO KAMAFUGÍTICO PELOS MÉTODOS AUTOMÁTICO E VISUAL (ALVO 1). O ALVO 2 FOI CLASSIFICADO COMO KAMAFUGÍTICO PELO MÉTODO VISUAL.....	63
FIGURA 5.14: RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS IDENTIFICADAS PELO MÉTODO AUTOMÁTICO, COM INDICAÇÃO DOS CORPOS KIMBERLÍTICOS CONHECIDOS. EM AMARELO, AS 16 ANOMALIAS COM MAIORES ESCORES. ....	65
FIGURA 5.15: CORPOS KIMBERLÍTICOS CONHECIDOS E RESULTADO DOS MÉTODOS VISUAL E AUTOMÁTICO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS. PONTOS AMARELOS INDICAM ANOMALIAS COINCIDENTES (<100M).....	66
FIGURA A1.1: IMAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO ANÔMALO (CMA). ....	II
FIGURA A1.2: IMAGEM DA AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO (ASA).....	III
FIGURA A1.3 IMAGEM DO CANAL DO POTÁSSIO (K).....	V
FIGURA A1.4: IMAGEM DO CANAL DO TÓRIO (TH).....	VI
FIGURA A1.5: IMAGEM DO CANAL DO URÂNIO (U). ....	VII
FIGURA A1.6: IMAGEM DA RAZÃO TH/K.....	VIII
FIGURA A1.7: IMAGEM DA RAZÃO U/K.....	IX
FIGURA A1.8: IMAGEM DA RAZÃO U/TH.....	X
FIGURA A2.1 – CAMPO GEOMAGNÉTICO (REYNOLDS, 1997).....	XIV

FIGURA A2.2: REPRESENTAÇÃO DA INTERAÇÃO DOS CAMPOS  
MAGNÉTICOS POLOIDAL E TOROIDAL. (FONTE:  
[HTTP://ZEBU.UOREGON.EDU/~JS/GLOSSARY/DYNAMO\\_EFFECT.HTML](http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/dynamo_effect.html))  
.....XV

FIGURA A2.3 – CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO (REYNOLDS, 1998). .....XV

FIGURA A2.4: ESPECTRO DOS RADIOELEMENTOS E DA CONTAGEM TOTAL.  
(IAEA, 2003). .....XX

## Capítulo 1: Introdução

---



## 1 - INTRODUÇÃO

Os kimberlitos despertam grande interesse nas empresas do setor mineral, visto que representam a principal fonte primária de diamante, que é o mineral mais valorizado do mercado. A apreciação econômica dos diamantes é milenar e tem como principal causa a sua aplicabilidade e sua raridade. Estima-se que apenas uma pequena porcentagem dos kimberlitos contenha teor economicamente viável para exploração de diamantes. No caso de depósitos primários, a dificuldade na localização, dimensões reduzidas em superfície e o baixo teor de minério são características que fazem dos kimberlitos um alvo singular.

Na região de Coromandel-MG, o que mais dificulta a identificação das fontes primárias dos diamantes, além dos fatores citados acima, é a presença de corpos kamafugíticos, que ocorrem juntamente com os kimberlitos. Os dois tipos de rochas se assemelham em vários aspectos, tais como forma do corpo, mineralogia e respostas geofísicas, mas somente os kimberlitos têm possibilidade de apresentar mineralização de diamantes.

Face às dificuldades de se encontrar e diferenciar corpos kimberlíticos, esta dissertação tem como objetivo o processamento e a análise estatística dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos para a distinção preliminar entre kimberlitos e kamafugitos da Província Alcalina do Alto Paranaíba (PAAP).

A diferenciação dos corpos por meio de gamaespectrometria apresenta várias restrições, que são ocasionadas principalmente pela pequena profundidade de investigação. No entanto, os corpos intrusivos da região de estudo são freqüentemente aflorantes, o que viabiliza a utilização deste método geofísico.

A aplicação do procedimento aqui proposto pode reduzir consideravelmente as etapas de investigação de campo e de sondagem, uma vez que otimiza os alvos das fontes primárias de diamantes e distingue dois tipos de intrusões: as kimberlíticas e as kamafugíticas.

A partir de estudos classificação petrológica das rochas intrusivas da PAAP, feitos por Araújo (2000), obteve-se um conjunto de características geoquímicas que puderam ser utilizadas como base para classificar o comportamento gamaespectrométrico dos corpos contidos na área de estudo. Seis corpos do trabalho

citado encontram-se dentro da área do aerolevante aqui estudado. Destes seis, três foram classificados como kimberlitos enquanto os outros três, como kamafugitos.

Os corpos Delta-01, Delta-02, Limpeza-05 e Limpeza-6 forneceram assinaturas aerogeofísicas que foram utilizadas como parâmetro para a distinção dos outros corpos conhecidos e a verificação de anomalias magnéticas até agora desconhecidas.

Os capítulos que compõem esta dissertação apresentam a contextualização geológica da área (Capítulo 2), seguida de uma revisão bibliográfica a respeito de gênese, locação, classificação e métodos de prospecção de kimberlitos e rochas associadas (Capítulo 3). Os métodos e técnicas são detalhadamente descritos no Capítulo 4, sendo seguido pela apresentação dos resultados em conjunto com a proposição de uma caracterização geofísica de kimberlitos e kamafugitos (Capítulo 5). Finalmente, algumas considerações juntamente com as conclusões de todo o trabalho são contempladas no Capítulo 6. Adicionalmente, os produtos utilizados para as classificações (imagens dos canais K, Th e U, e magnetométricas ASA e CMA) são apresentados no Anexo I, enquanto as fundamentações teóricas sobre os métodos magnetométrico e gamaespectrométrico encontram-se no Anexo II.

### **1.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

O polígono definido para a realização dos estudos engloba totalmente ou parte de oito municípios, dentre os quais destacam-se Coromandel, Vazante, Patos de Minas, Paracatu, Guarda-Mor e Unaí, todos no Estado de Minas Gerais. A figura 1.1 indica os municípios interceptados e contidos no polígono.

A cidade de Guarda-Mor foi tomada como referência por estar na porção central da área. O acesso é feito, a partir de Brasília, pela BR-040 até a cidade de Paracatu, onde se toma a rodovia MG-188 até a cidade de Guarda-Mor. O trajeto de aproximadamente 300km é feito totalmente por estradas pavimentadas, em boas condições de conservação e sinalização à época da elaboração deste volume.

Partindo de Belo Horizonte, o percurso é feito pela BR-040 por 500km até a cidade de Paracatu, onde a rodovia MG-040 dá acesso à cidade de Guarda-Mor, que dista 70km.

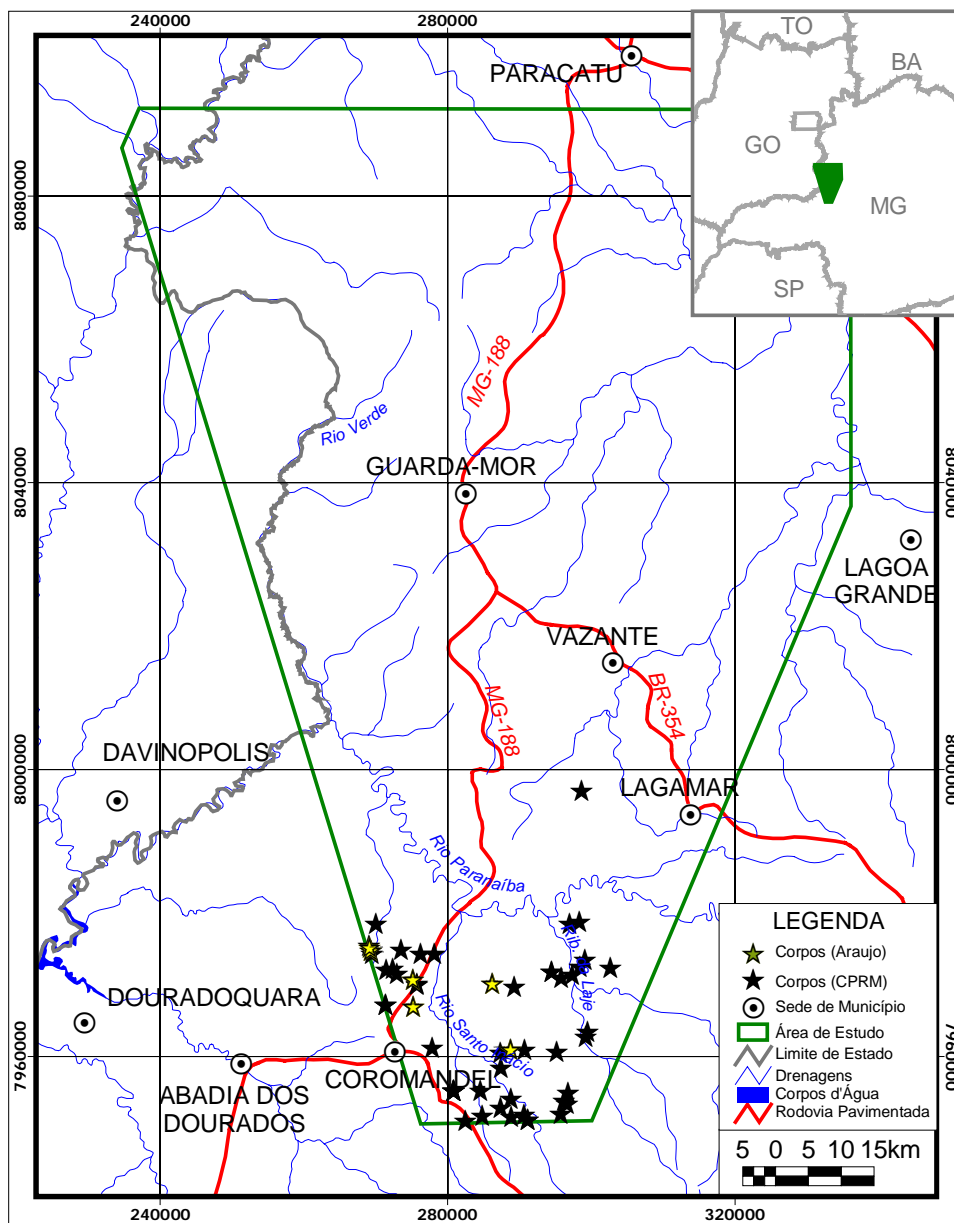


Figura 1.1: Localização da área de estudo. (Modificado de IBGE, 2005).

## **Capítulo 2: Contexto Geológico**

---

## 2 – CONTEXTO GEOLÓGICO

O arcabouço geológico da região onde está inserida a área de estudo é formado por unidades que fazem parte de três compartimentos geotectônicos – a Província Tocantins, a Bacia do Paraná e a Bacia San-Franciscana –, sendo predominante as unidades que fazem parte da Faixa Brasília, na Província Tocantins (Figura 2.1).

### 2.1 – FAIXA BRASÍLIA

A Faixa de Dobramentos Brasília (FDB), foi formada durante o Neoproterozóico pela Orogênese Brasileira, que comprimiu entre três crátons – Amazônico, São Francisco e um hipotético, que estaria sob os sedimentos da Bacia do Paraná – as unidades ali depositadas (Fuck, 1994; Dardenne, 2000).

Limitada pelo Cráton São Francisco, a leste, a Bacia do Paraná a sudoeste, a Faixa Paraguai-Araguaia a oeste e o Cráton Amazônico a noroeste, a FDB tem direção geral NW-SE e seus litotipos apresentam aumento no grau metamórfico de leste para oeste, desde incipiente até fácies granulito.

Esta variação na intensidade do metamorfismo permitiu que fosse formulada a compartimentação da Faixa em zonas metamórficas. Costa & Angeiras (1971), Dardenne (1978) e Fuck (1994) sugerem a divisão da faixa em três segmentos principais, de acordo com o grau de metamorfismo, e criam as zonas Cratônica, Externa e Interna, de leste para oeste.

No entanto, a existência de uma megainflexão na altura do paralelo 16°S, identificada por Costa *et al.* (1970) permite também a subdivisão da Faixa nos segmentos Norte e Sul (Araújo Filho, 1980; Schobbenhaus *et al.*, 1984; Araújo Filho 2000; Strieder, 1993; Fonseca, 1996 e Fonseca & Dardenne, 1996). Esta proposta se justifica pela diferença na evolução tectônica a norte e a sul desta estrutura denominada Sintaxe ou Megainflexão dos Pireneus, na região de Pirenópolis e Corumbá, no Estado de Goiás. Excluem-se desta segmentação o Arco magmático de Goiás e o Grupo Bambuí, que mantêm as mesmas características em toda a extensão da Faixa.

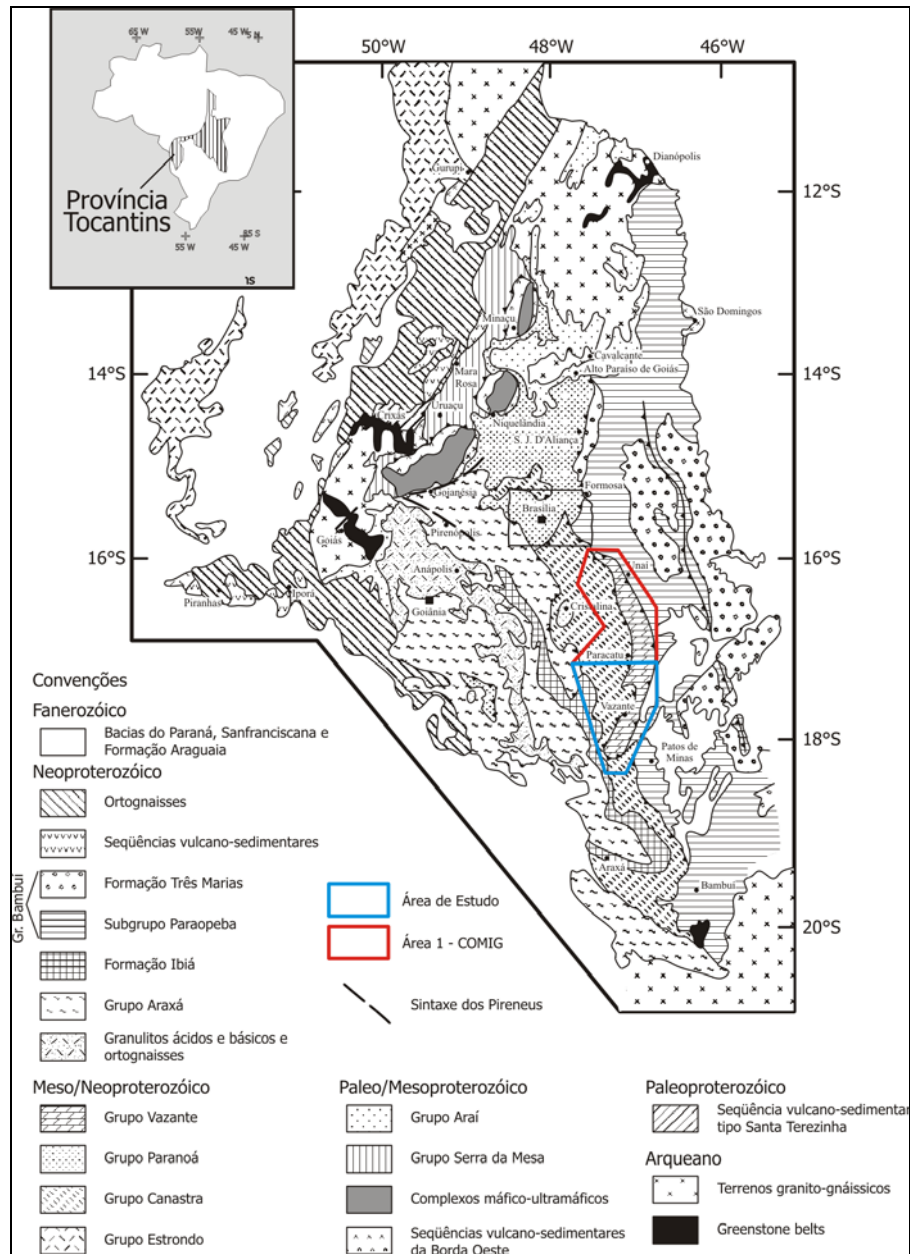


Figura 2.1: Mapa geológico e posicionamento estratigráfico das unidades Proterozóicas da Faixa de Dobramentos Brasília. A área de estudo (azul) é parte da Área 1 do aerolevantamento da COMIG (vermelho). Modificado de Marini *et al.* (1981) e Fuck, (1994).

### 2.1.1 – Segmento Norte

A principal característica do segmento norte é a preservação das feições originais das unidades, com estruturas primárias quase sempre preservadas, assim como suas relações de contato.

Segundo Dardenne (2000), este segmento é formado pelos grupos Araí, Paranoá e Serra da Mesa, além das seqüências vulcano-sedimentares de Juscelândia, Indaianópolis e Palmeirópolis.

#### 2.1.1.1 – Grupo Araí

O Grupo Araí é uma seqüência metassedimentar depositada em ambiente de rifte e deformada pela Orogênese Brasileira. Apresenta como características típicas de rifte o vulcanismo bimodal, sedimentos de leque aluvial e interdigitação de unidades, entre outras.

Segundo Barbosa *et al.* (1969), sua deposição se deu em dois estágios: um, de sedimentação continental e outro, marinho. O primeiro originou a Formação Arraias, composta de leques aluviais, manifestações vulcânicas bimodais, quartzitos e arcóseos. A Formação Traíras representa a fase marinha do Rifte Araí, onde são encontrados ritmitos, carbonatos, pelitos e quartzitos.

O Grupo Araí é correlacionável ao Supergrupo Espinhaço, no que se refere aos litotipos, à evolução tectônica e às idades a ele atribuídas. A idade do vulcanismo ácido do Grupo Araí é de 1,77 Ga (Pimentel, 1991), semelhante às idades encontradas para as unidades basais do Supergrupo Espinhaço, que está em torno de 1,75Ga (Almeida-Abreu & Renger, 2002).

O embasamento do Grupo Araí é constituído essencialmente pelas rochas da Suíte Aurumina, do grupo Ticunzal além de outras rochas granito-gnáissicas do paleoproterozóico.

#### 2.1.1.2 – Grupo Paranoá

O Grupo Paranoá apresenta uma seqüência sedimentar de margem passiva (Guimarães, 1997), composta principalmente por psamitos, pelitos e carbonatos (Dardenne, 1978, 1979, 1981).

Segundo Dardenne (2000) as idades sugeridas para a sedimentação do Grupo Paranoá, a partir da caracterização de estromatólitos, está entre 1,2Ga e 900Ma, intervalo observado entre a deposição dos grupos Araí e Bambuí.

As unidades basais são compostas por sedimentos de maré e supra-maré e são recobertas por unidades de ambiente marinho dominado por correntes de maré.

Observa-se uma grande variação de litotipos nas unidades superiores, o que sugere sedimentação em ambiente com grandes variações de maré (Dardenne, 2000).

### 2.1.2 – Segmento Sul

O segmento Sul apresenta grande complexidade estrutural e estratigráfica que inviabiliza por vezes o empilhamento seguro das unidades, além de dificultar a definição de ambientes de sedimentação e o entendimento da evolução geotectônica do mesmo. Abaixo, são descritas sucintamente as características de cada unidade que compõe o Segmento Sul.

#### 2.1.2.1 – Grupo Vazante

Dardenne (1979) define o Grupo Vazante como unidades carbonáticas e pelíticas intercaladas (Figura 2.2). As unidades carbonáticas são caracterizadas por biohermas, brechas dolomíticas e calcários, com ocorrências de manganês nas proximidades de Unai-MG. As unidades pelíticas são principalmente ardósias e filitos, intensamente dobrados, com *kinks* e *chevrons*. Duas direções de dobramento estão impressas no Grupo Vazante e a interferência entre elas gera um padrão identificado como do tipo domo-bacia.

Mineralizações importantes de Zn e Pb são encontradas associadas aos carbonatos da Formação Morro do Calcário, além de depósitos de Zn na Formação Serra do Poço Verde.

#### 2.1.2.2 – Grupo Canastra

As primeiras descrições do Grupo Canastra foram feitas por Barbosa (1955), quando descreveu o conjunto de quartzitos e filitos na região de Araxá e ainda o considerava com o *status* de formação. Barbosa *et al.* (1970), Campos Neto (1984), Freitas-Silva & Dardenne (1994), Simões & Valeriano (1990), Valeriano (1992) e Simões (1995) contribuem e discutem em seus trabalhos as diversas propostas que tratam do Grupo Canastra em toda a sua extensão.

O Grupo Canastra representa parte de uma bacia de margem passiva, aberta no fim do mesoproterozóico, com expressão predominante a sul de Brasília e guarda



conspícuas relações de contato com o Grupo Araxá. Segundo Pimentel *et al.* (1999), esta abertura se deu em torno de 1.300Ma.

Coluna	Depósitos Minerais	Descrição	Membro	Formação	Grupo	
	Au - Morro do Ouro	Filitos cinza	Serra da Anta	Paracatu	CANASTRA	
		Filitos carbonosos c/ intercalações de quartzitos	Morro do Ouro			
		Filitos verdes calcíferos	Serra do Landum			
			M Ardósias carbonatadas cinza Lentes de dolomitos Ardósias carbonatadas pretas	Serra da Lapa Velosinho	Lapa	V A Z A N T E
	Pb-Zn - Morro Agudo	L Bioherma estromatolítico c/ fácies de brechas e dolarenitos	Pamplona Superior	Morro do Calcário		
		K Dolomitos rosados c/ esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	Pamplona Médio	Morro do Poço Verde		
	Zn - Vazante	J Ardósias cinza-esverdeado c/ intercalações de dolomitos rosados	Pamplona Inferior			
		I Dolomitos cinza-escuro c/ esteiras estromatolíticas e <i>bird's eyes</i>	Morro do Pinheiro Sup	Serra do Pinheiro		
		H Dolomitos cinza-claro a rosados c/ níveis de brechas e dolarenitos	Morro do Pinheiro Inf.			
		G Ardósias c/ raras lentes de quartzitos		Serra do Garrote		
	F Bioherma estromatolítico Calcários cinza-escuro Brechas dolomíticas	Sumidouro	Lagamar			
	E Conglomerados	Arrependido	Rocinha			
Fosforito 3 - Lagamar	D Ritmitos					
Fosforito 2 - Rocinha	C Ardósias cinza-escuro, piritosas e fosfatadas					
	B Ritmitos					
	Fosforito 1 - Coromandel Diamictito	A Intercalações de quartzitos, fosforitos, diamictitos e ardósias		São Antônio do Bonito		

Figura 2.2: Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante e sua relação com o Grupo Canastra, segundo Dardenne (2001).

As rochas deste grupo afloram em uma faixa de mais de 650km, desde o sudoeste de Minas Gerais (extremo sul da FDB) até o sudeste de Goiás e sul do Distrito Federal. Encontram-se em contato tectônico com o grupo Araxá e Ibiá, sendo difícil a reconstituição das relações de contato originais com estes grupos. Porém, na região de estudo, Pereira (1992) detalha e complementa a estratigrafia do grupo em um trabalho que descreve as relações deste com o Grupo Ibiá.

Freitas-Silva & Dardenne (1994) apresentam uma definição mais atualizada do Grupo Canastra, no qual este se subdivide em três formações, representadas na figura 2.3.

A unidade basal é a Formação Serra do Landim, composta por calci-filitos e calci-xistos e tem aproximadamente 250m de espessura. Foi inicialmente atribuída à então Formação Vazante (Madalosso e Valle, 1978; Madalosso, 1980), porém Freitas-Silva (1996) a inclui no Grupo Canastra.

Filitos e xistos carbonosos são os principais litotipos da Formação Paracatu, unidade estratigraficamente intermediária do Grupo Canastra. Apresentam deformação significativa, com formação de sigmóides de quartzo, onde se alojam pequenas concentrações de ouro. Intercalações de quartzito e carbonatos são comuns nesta unidade (Freitas-Silva & Dardenne, 1994).

A Formação Chapada dos Pilões é composta por quartzitos e filitos, na porção basal e quartzitos no topo. Forma, juntamente com a Formação Paracatu, uma seqüência indicativa de um megaciclo regressivo (Dardenne, 2000).

#### 2.1.2.3 – Grupo Ibiá

O atual Grupo Ibiá foi descrito pela primeira vez na literatura por Barbosa *et al.* (1970), como o conjunto de rochas xistosas nas proximidades de Ibiá (MG), tendo posteriormente associações com psefitos e rochas máficas metamorfizadas (Simões & Navarro, 1996).

Pereira (1992), em um estudo na região de Coromandel-MG, eleva a então formação à categoria de grupo e o define como uma seqüência glaciogênica, composta por duas formações principais: Cubatão e Rio Verde (Figura 2.3). A primeira é um pacote de diamictitos que forma a base do grupo; é interpretada como uma unidade sedimentada em ambiente sub-glacial e que tem como embasamento os sedimentos do Grupo Canastra. A Formação Rio Verde é composta por pelitos carbonáticos, cuja deposição se deu em ambiente glácio-marinho proximal.

### 2.1.2.4 – Grupo Araxá

O Grupo Araxá é definido por Seer (1999) como uma seqüência ígnea máfica recoberta por sedimentos pelíticos. Todo o pacote foi metamorfizado em fácies anfibolito, evento cuja idade foi estimada em cerca de 630 Ma.

É representado por anfibolitos, xistos e quartzitos, está tectonicamente alocado sobre o grupo Ibiá (Figura 2.3) e é recoberto pelos arenitos da formação Botucatu, da Bacia do Paraná. Estes afloram na região de Romaria e Estrela do Sul, nos vales dos rios Araguari e Bagagem.

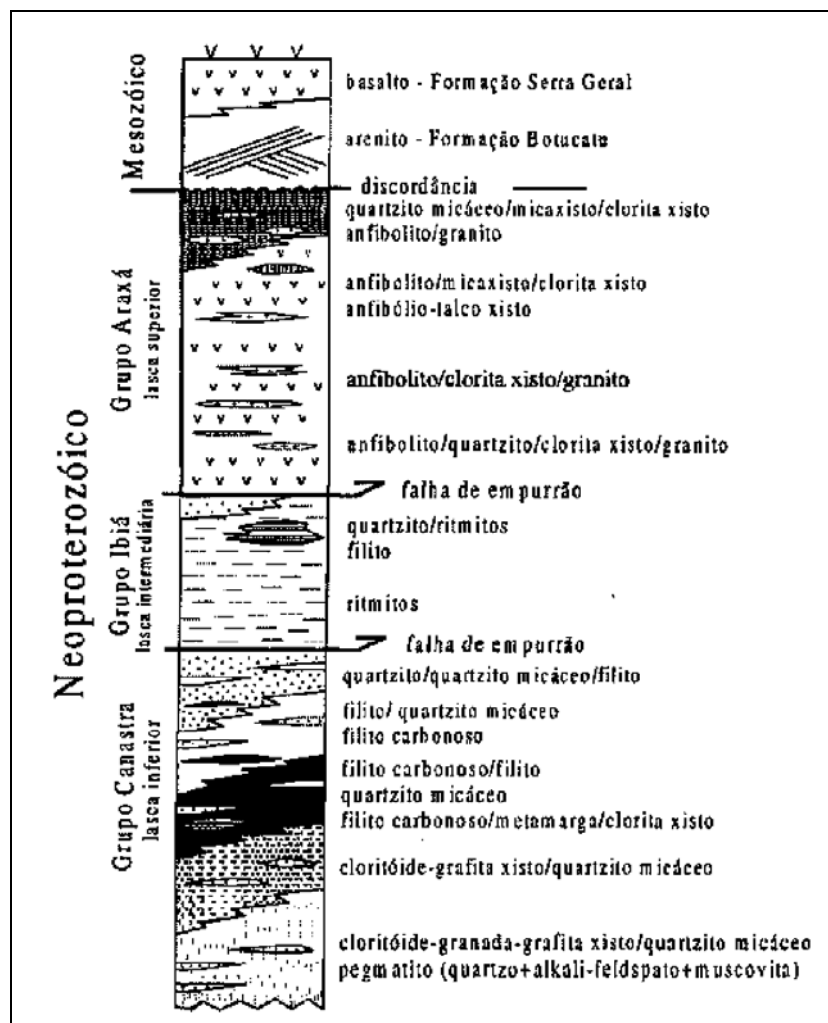


Figura 2.3: Coluna litoestratigráfica mostrando as relações de contato entre os grupos Canastra, Ibiá e Araxá. (Modificado de Seer, 1999).

As unidades que compõem o grupo têm origem tanto sedimentar – xistos e quartzitos –, quanto magmática – anfibolitos – e devido à complexidade estrutural se

torna difícil sua separação em formações. Seer *et al.* (2001) sugere que o termo “Grupo Araxá” seja restrito apenas ao conjunto de rochas ígneas, que representam fragmentos de crosta oceânica.

#### 2.1.2.5 – Grupo Bambuí

É uma seqüência pelito-carbonatada, com exposições que se estendem desde áreas sobre o Cráton São Francisco, na Bahia, até o sul de Minas Gerais. É caracterizado por sedimentação em mar relativamente raso (Dardenne, 1978), num contexto de bacia do tipo *foreland* (Castro, 1997; Guimarães, 1997). É composto pelas cinco formações descritas a seguir e apresentadas na figura 2.4.



Figura 2.4: Coluna litoestratigráfica do Grupo Bambuí. (Guimarães, 1997).

- **Formação Sete Lagoas:** é composta por rochas carbonáticas, margosas e pelíticas compreendendo folhelhos, margas, calcários e dolomitos. As rochas

carbonáticas ocorrem na forma de lentes de dimensões variadas. Sobrepe-se discordantemente à formação Jequitaí;

- **Formação Serra da Santa Helena:** compreende siltitos e folhelhos cinza-esverdeados, com intercalações de arenitos finos. O contato com a unidade superior é concordante, geralmente gradacional;
- **Formação Lagoa do Jacaré:** compreende siltitos e calcários argilosos, com intercalações de calcário cinza-escuro, fétidos, que se alternam em calcários oolíticos, pisolíticos e intraclastos;
- **Formação Serra da Saudade:** é composta por folhelhos, argilitos e ritmitos esverdeados que gradam para siltitos arcoseanos;
- **Formação Três Marias:** é formada por sedimentos imaturos, como arcóseos, grauvacas e siltitos cinza-esverdeados. Repousa em contato concordante transicional sobre as rochas da Formação Serra da Saudade.

## 2.2 – BACIA SAN-FRANCISCANA

A Bacia San-Franciscana é representada na área pelos grupos Santa Fé, Areado, Mata da Corda e Urucuia, que se desenvolveram durante o período Cretácio, além do Grupo Santa Fé, depositado durante o Carbonífero (Figura 2.5). Sgarbi *et al.* (2001) definem o arcabouço geotectônico da região como resultado de eventos tectônicos de características de subsidência termal, o que permitiu a deposição dos grupos Santa Fé, Areado e Urucuia e da instalação do Grupo Mata da Corda (Figura 2.6).

### 2.2.1 – Grupo Santa Fé

Foi definido por Campos (1992), e é representado por sedimentos glaciogênicos que registram a glaciação ocorrida entre os períodos Carbonífero e Permiano no continente de Gondwana. Esses registros se dão na forma de tilitos, seixos caídos e varvitos, além de pavimentos estriados.

As unidades basais do Grupo Santa Fé, que compõem a Formação Floresta, são sedimentos tipicamente glaciais, sendo compostos por tilitos, folhelhos, arenitos e arcóseos. Encontram-se em contato erosivo com as rochas da Formação Três Marias

(Grupo Bambuí), que apresenta depressões onde se alojam as unidades glaciais do permo-carbonífero.

A presença de pavimentos estriados nas unidades superiores do Grupo Bambuí e de seixos estriados na base do Grupo Santa Fé corrobora a origem glaciogênica deste último (Campos 1992; Campos & Dardenne, 1997a).

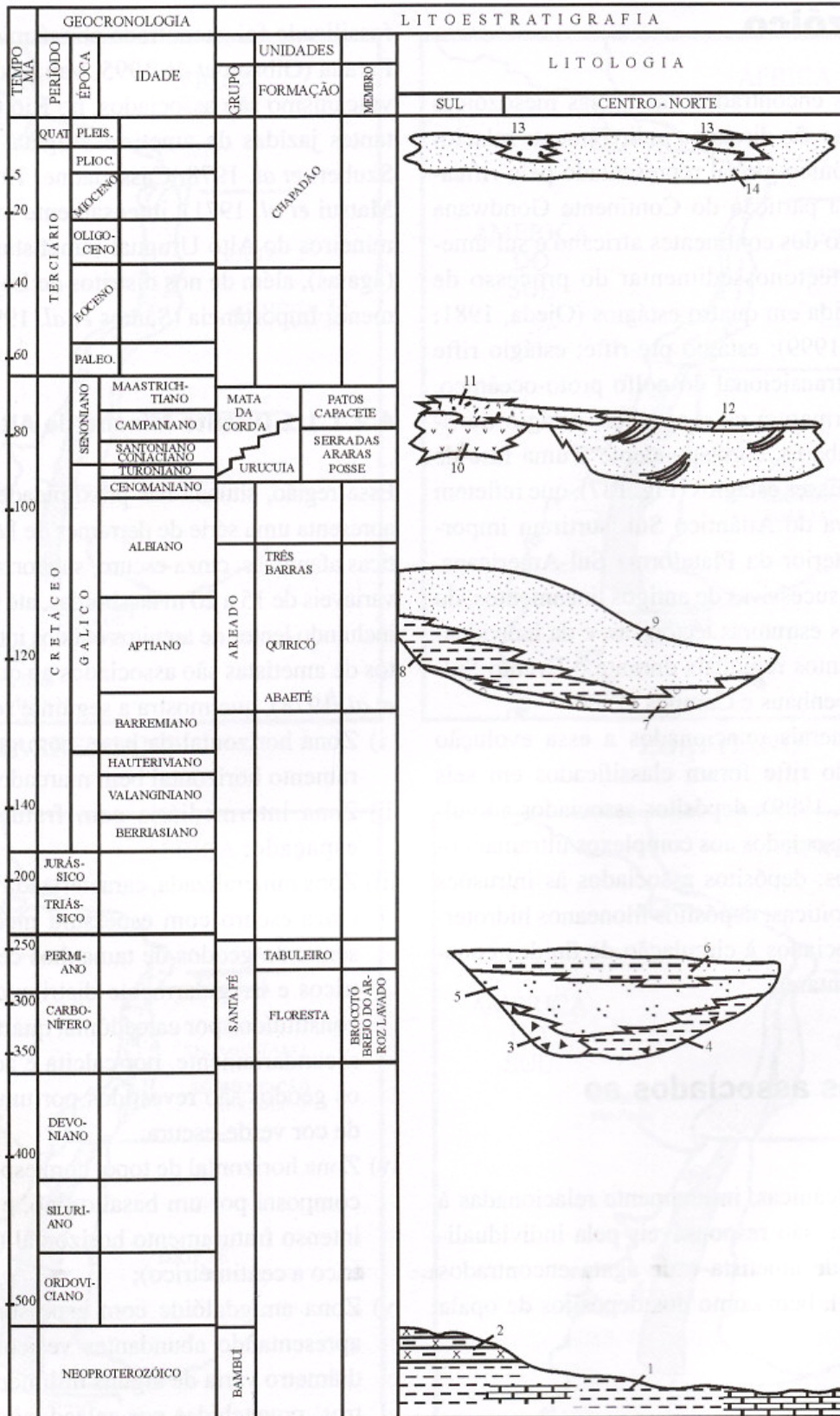


Figura 2.5: Coluna litoestratigráfica da Bacia Sanfranciscana. (Campos & Dardenne, 1997a)

A Formação Tabuleiro é a unidade de topo do Grupo Santa Fé e difere da Formação Floresta por ser composta essencialmente por sedimentos depositados em ambiente pró-glacial eólico-lacustre, segundo (Sgarbi *et al.*, 2001). Está depositada sobre a Formação Floresta ou diretamente sobre as unidades da Formação Três Marias.

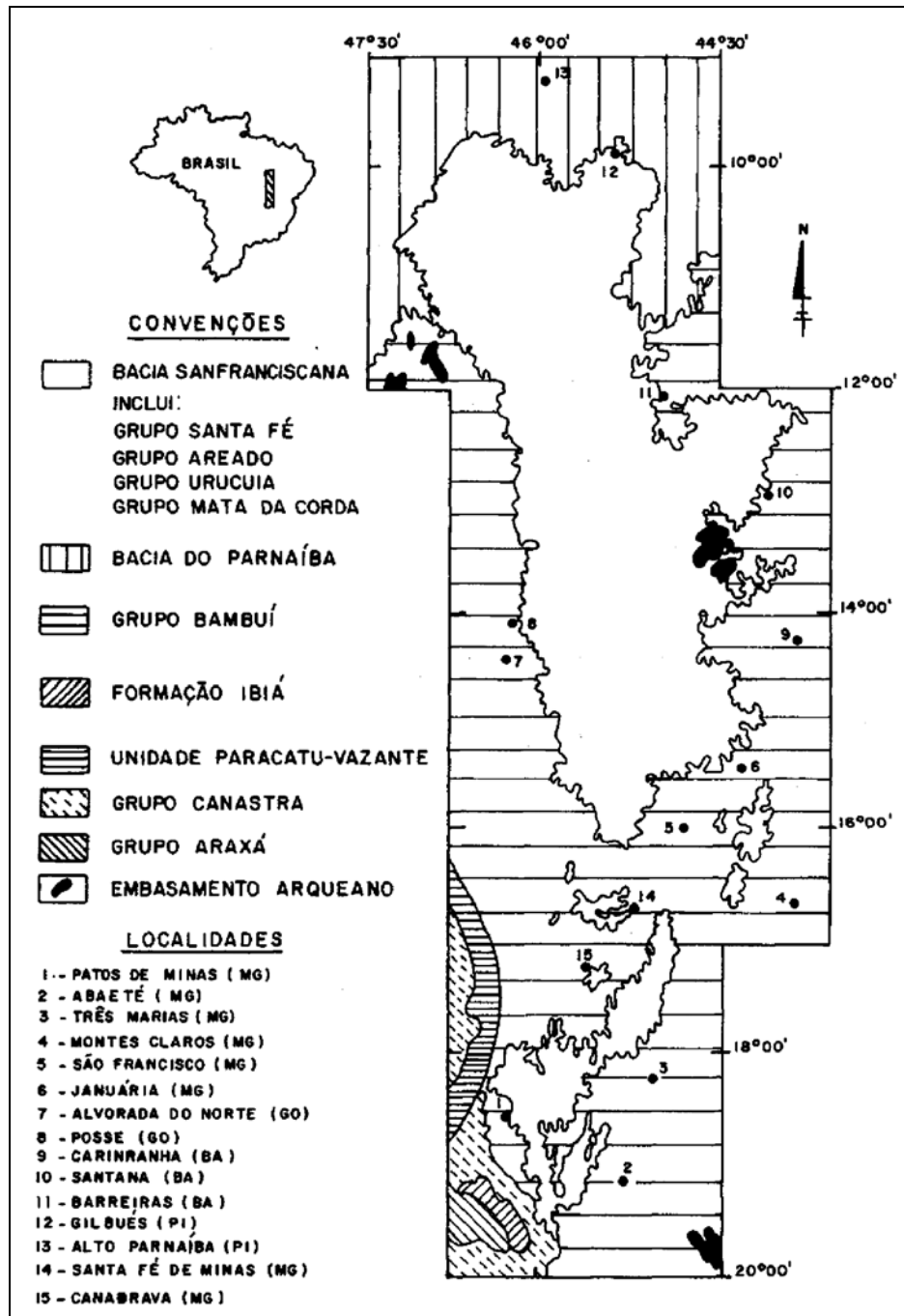


Figura 2.6: Mapa da Bacia Sanfranciscana e seu embasamento (Campos & Dardenne, 1997a).



### 2.2.2 – Grupo Areado

O Grupo Areado foi denominado como formação pela primeira vez por Barbosa (1965), sendo elevado à categoria de grupo por Costa e Grossi Sad (1968). Segundo Sgarbi *et al.* (2001), o Grupo Areado é uma seqüência sedimentar de complexa estruturação e com grande variedade faciológica.

A Formação Abaeté é a base da seqüência, com conglomerados matriz e clasto-suportados, apresentando depósitos do tipo *wadi*, indicativos de ambiente desértico (Sgarbi, 1989).

Recobrando a anterior, os pelitos da Formação Quiricó foram formados em lagos do tipo *playa* e apresenta bioturbações fósseis e icnofósseis variados. Intercalações de arenitos e carbonatos são comuns, assim como estruturas do tipo *hummocky* e *teepee* (Sgarbi, 1989).

O topo do Grupo Areado é a Formação Três Barras, composta essencialmente por arenitos depositados em dois ambientes: flúvio-deltaico e fluvial meandrante (Seer *et al.*, 1989; Sgarbi, 1989).

### 2.2.3 – Grupo Mata da Corda

O Grupo Mata da Corda vêm sendo estudado desde a primeira metade do século passado, com interesse de se descobrir as fontes primárias dos diamantes que ocorrem em sedimentos rudíticos fluviais da região do Alto Paranaíba (Sgarbi *et al.*, 2001). Porém, Barbosa *et al.* (1970) também avalia o potencial para mineralização de platina nos tufos deste grupo.

Este grupo está dividido em duas formações, sendo a basal constituída por derrames e intrusões kamafugíticas e denominada Formação Patos. A segunda, Formação Capacete, apresenta sedimentos de leque aluvial e de ambiente fluvial entrelaçado.

### 2.2.4 – Província Alcalina do Alto Paranaíba

A Província Alcalina do Alto Paranaíba está localizada na borda NE da Bacia do Paraná (Figura 2.7) e é caracterizada por manifestações magmáticas do período

Cretáceo (Barbosa *et al.*, 1970, Leonardos & Meyer, 1991; Tallarico, 1993), quando o soerguimento de um arco separou as bacias do Paraná e a Sanfranciscana (Campos & Dardenne, 1997b). Kimberlitos, carbonatitos e kamafugitos são os principais representantes desta manifestação, sendo este último grupo, o mais expressivo derrame deste tipo conhecido no mundo, com aproximadamente 23.000 km<sup>3</sup> (Gibson *et al.*, 1995; Sgarbi *et al.*, 2001; Araújo, 2000).

Segundo Gibson *et al.* (1995) esta província teve como origem a ascensão da Pluma Mantélica de Trindade, a qual estaria relacionada também ao derrame basáltico da Bacia do Paraná, assim como todas aquelas províncias alcalinas que a circundam. Outros autores (Bizzi *et al.*, 1991; Bizzi, 1993; Bizzi *et al.*, 1995; Van Decar *et al.*, 1995) sugerem que os magmas da PAAP tiveram como fonte a mesma pluma associada ao *hot spot* de Tristão da Cunha.

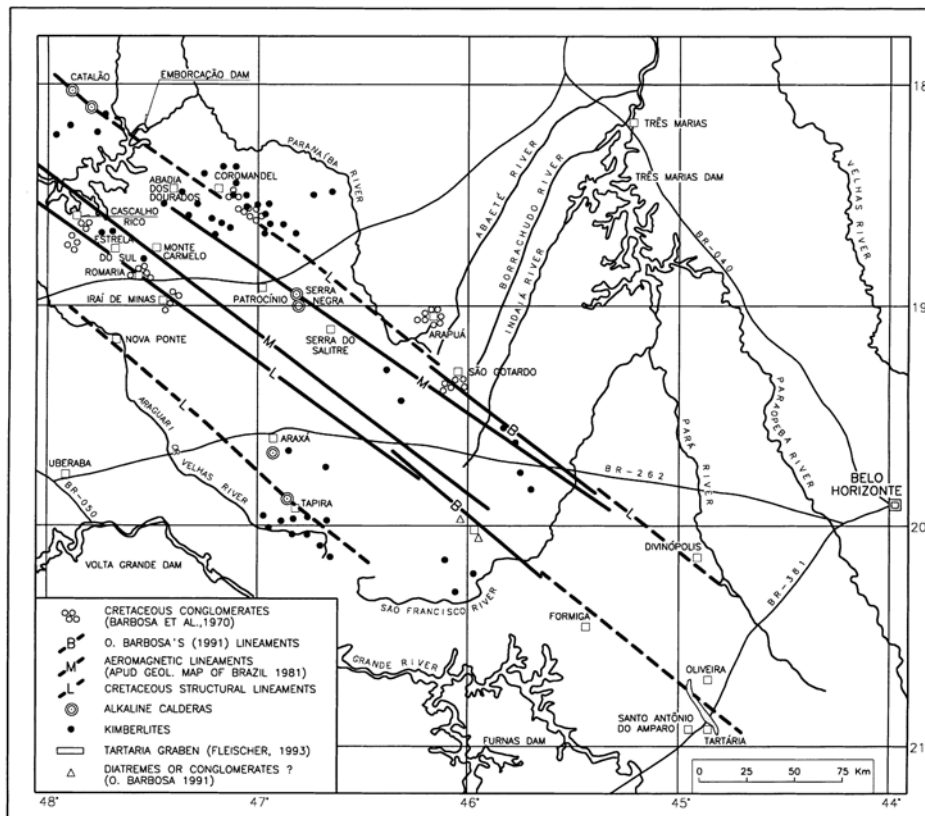


Figura 2.7: Mapa do Alto Paranaíba e suas principais feições tectono-magmáticas (Fleischer, 1998)

A PAAP abriga importantes depósitos minerais associados às intrusões, principalmente as carbonatíticas, de onde são extraídos os minérios de fosfato e nióbio,

principalmente. Minério de Ti e terras raras também são encontrados, associados às intrusões de filiação carbonatítica (Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

Com relação a mineralizações primárias de diamante, atualmente são poucos os kimberlitos mineralizados conhecidos na PAAP e apenas o corpo Canastra deverá ser explorado. Segundo Pisani (2006), os corpos do Brasil têm sido considerados como estéreis principalmente por causa do volume insuficiente das amostras adquiridas dos kimberlitos com vistas à detecção de diamantes. Segundo o autor, a amostragem ideal seria acima de 50t, valor superior ao máximo efetuado pelas campanhas brasileiras, podendo estas ter subestimado a concentração do minério.

Evidências petrológicas também evidenciam o grande potencial de mineralização primária da PAAP (Carvalho, 1997; Svisero *et al*, 2004).

## **Capítulo 3: Kimberlitos**

---

### 3. KIMBERLITOS

#### 3.1 - FORMAS DE OCORRÊNCIA DE KIMBERLITOS

Os kimberlitos são classificados como rochas ultramáficas alcalinas, ultrapotássicas e têm ocorrência nos cinco continentes, com idades variadas (desde o Pré-Cambriano ao Cretáceo) e em contextos geológicos distintos. São explorados principalmente na África do Sul, Angola, Canadá, Sibéria e Austrália, onde foram e ainda são realizados estudos aprofundados envolvendo diversas áreas como petrologia, geofísica, geoquímica e tectônica.

Ocorrem como intrusões associadas a estruturas profundas, que atingem ou estão próximas ao manto, e por ascenderem à crosta em alta velocidade, trazem em seu trajeto fragmentos mantélicos, fato que os torna de grande interesse para a comunidade geocientífica. Segundo Mitchell (1995), esses fragmentos podem ser peridotitos (dunito, harzburgito, lherzolito), ou ainda eclogitos do manto (Figura 3.1). O magma kimberlítico chega à superfície por meio de plumas que têm origem na região entre os limites manto-núcleo e manto superior-manto inferior (Haggerty, 1999).

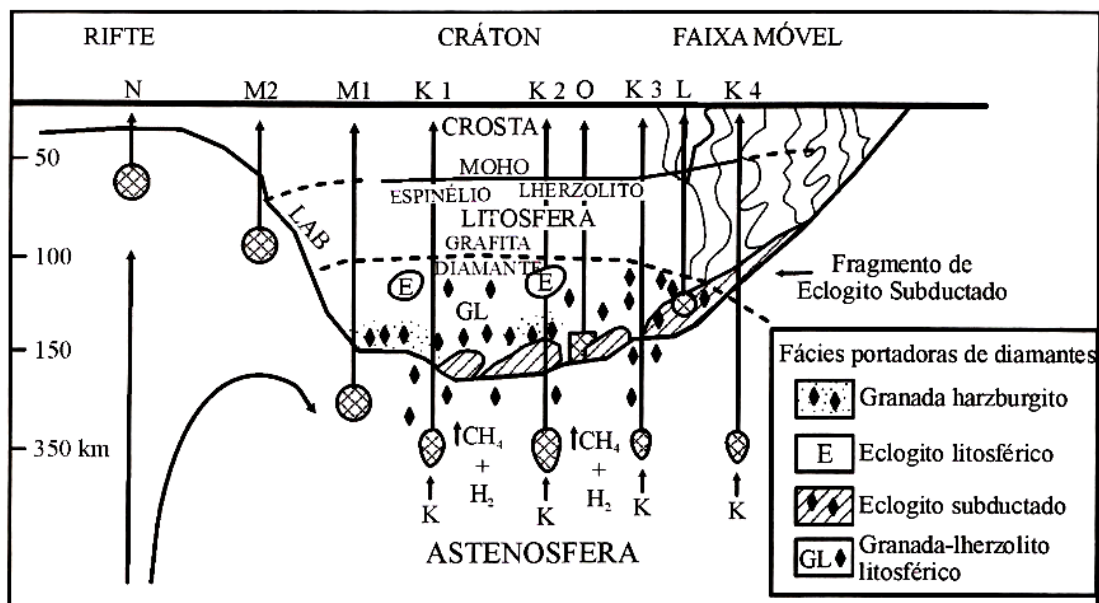


Figura 3.1: Modelo crustal para ambiente de formação de diamantes, mostrando a linha de estabilidade entre diamante e grafita. K: kimberlito; O: orangeíto; L: lamproíto; M: melilito; N: nefelinitos e carbonatitos. Modif. Mitchell (1995).

No Brasil, é conhecida a relação dos corpos alcalinos com os lineamentos *Transbrasiliano* e *AZ-125°* (Gonzaga e Tompkins, 1991; Tompkins e Gonzaga, 1989),

ao longo dos quais são conhecidas ocorrências nos estados de Minas Gerais (Alto Paranaíba), Mato Grosso (Juína, Pontes e Lacerda, Paranatinga e Aripuanã), Goiás (Amorinópolis), Rio Grande do Sul (Jaguari-Rosário do Sul), Santa Catarina (Lajes) e Piauí (Picos e Gilbués), segundo Araujo (2000).

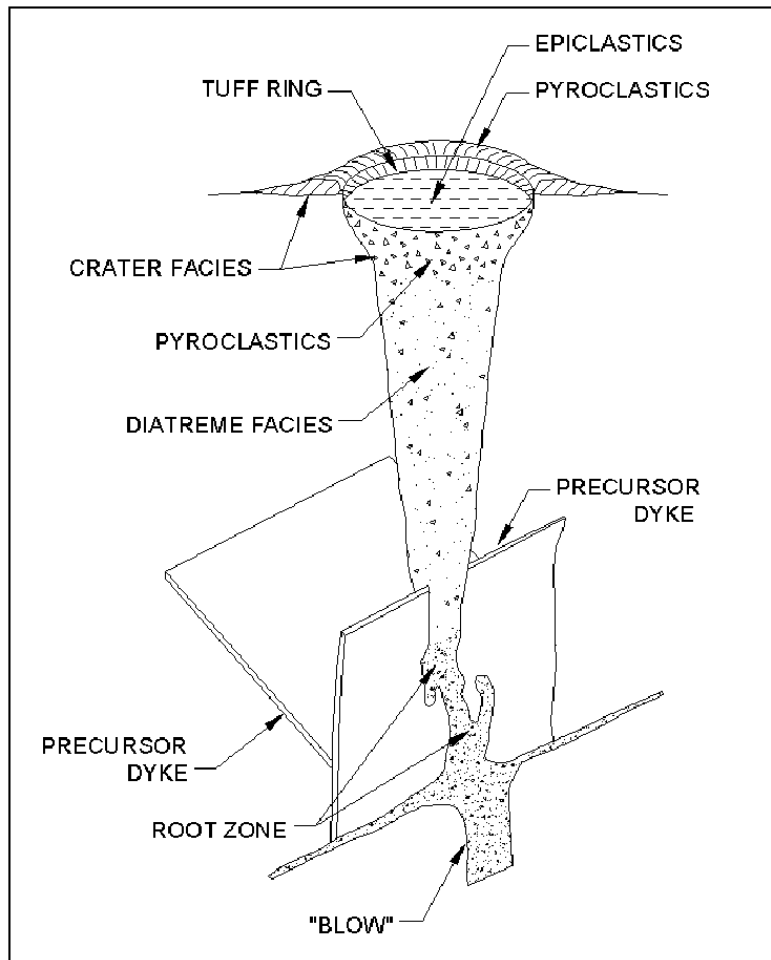


Figura 3.2: Morfologia esquemática de um corpo kimberlítico. Modificado de Mitchell (1986).

No que se refere à mineralizações, o interesse maior nestes corpos está voltado àqueles que estão alojados em regiões cratônicas ou em suas faixas marginais, pois há uma conhecida relação entre a ocorrência de diamantes em corpos cujas encaixantes foram estabilizadas, via de regra, no Pré-Cambriano (Janse, 1994). Essa relação é vista na figura 3.1, que ilustra a curva de estabilidade grafita/diamante a aproximadamente 150km de profundidade, facilmente alcançada pela porção basal dos crátons, onde são formados os diamantes. Como o magma kimberlítico não tem nenhuma relação genética

com os diamantes, este exerce apenas a tarefa de transportador, possibilitando a ascensão das gemas à superfície (Mitchell, 1986).

A estruturação de um corpo kimberlítico é mostrada na figura 3.2, na qual nota-se a presença de diques precursores na alocação do corpo, além das diversas fácies possíveis de se encontrar.

### **3.2 – CLASSIFICAÇÃO PETROLÓGICA DE ROCHAS KIMBERLÍTICAS**

As rochas kimberlíticas e relacionadas podem ser divididas em vários grupos, de acordo com sua textura, além das composições mineralógica e geoquímica.

Várias tentativas de classificação foram sugeridas, porém somente nos anos 90 foram definidos parâmetros mais consistentes para tal objetivo. Bizzi (1993) e Bizzi *et al.* (1991) já haviam atestado que os corpos kimberlíticos encontrados na Província Alcalina do Alto Paranaíba não se enquadravam na classificação da época. Segundo os autores, as características isotópicas são distintas das de kimberlitos de outras partes do globo.

Na região também são encontrados kamafugitos que representam grande parte dos corpos intrusivos da PAAP (Bizzi *et al.*, 1995; Gibson *et al.*, 1995; Brod *et al.*, 2000; Sgarbi *et al.*, 2000; Araújo, 2000). Por apresentarem ínfimas possibilidades de estarem mineralizados, os kamafugitos não oferecem interesse no que se refere à exploração primária de diamante.

Neste trabalho será adotada a classificação elaborada por Araújo (2000) para classificação dos corpos da região de Coromandel-MG. A autora toma como base a definição dos quatro grupos de rochas de afinidade kimberlítica de Mitchell (1995). Apesar de ser contestada por vários pesquisadores, essa classificação apresenta critérios bem definidos em termos geoquímicos e petrográficos, que auxiliam na identificação destas rochas.

A classificação proposta por Mitchell (1995) está relatada a seguir e resumida na Tabela 1. Uma caracterização petrográfica sucinta dos kamafugitos é feita logo em seguida.

### 3.2.1 - Kimberlitos

Antes da nomenclatura proposta por Mitchell (1995), essas rochas eram denominadas kimberlitos do Grupo 1. São definidas como um grupo de rochas que apresentam feições mineralógicas e petrográficas típicas de magmas ricos em voláteis, dentre os quais predomina o CO<sub>2</sub>.

A principal feição característica distintiva dos kimberlitos, quando presente, é a textura inequigranular, resultante da presença macrocristais e/ou megacristais imersos em uma matriz fina.

Apresentam matriz fina composta principalmente por olivina, podendo ser acompanhada por monticellita, flogopita, perovskita, solução sólida de ulvoespínélio magnésiano – Mg-cromita – ulvoespínélio – magnetita, apatita e serpentina, todos de origem primária, podendo haver alteração de alguns minerais primários para serpentina. Estes corpos não apresentam, na matriz, diopsídio primário, porém pode ocorrer na forma de fase secundária, quando há a presença de xenólitos mantélicos.

Os macrocristais e megacristais são comumente anédricos e são representados tipicamente por olivina, ilmenita, piropo, diopsídio, flogopita, enstatita e cromita. Esses minerais apresentam composições típicas, que caracterizam a rocha. Algumas destas variações são:

- **Diopsídio:** baixos teores de Cr, comumente sub-cálcico;
- **Ilmenita:** é tipicamente magnésiana;
- **Piropo:** titanífero e com baixos teores de Cr;
- **Cromita:** pobre em Ti.

### 3.2.2 - Orangeítos

Anteriormente classificados como kimberlitos do grupo 2, apresentam diferenças consideráveis no que se refere à assinatura petrogenética e mineralógica. Assim como os kimberlitos, os orangeítos são rochas ricas em voláteis, porém dentre esses, predomina a molécula de H<sub>2</sub>O.

Nestas rochas, a mica é abundante. Apresentam macrocristais e microfenocristais de flogopita e olivina, esta última podendo formar cristais primários euédricos. A matriz é composta por diopsídio, espínélio (Mg-cromita a Ti-magnetita) perovskita, apatita, fosfatos ricos em ETR (monazita e daquingshanita), titanatos do



grupo da holandita, rutilo e ilmenita. A perovskita e apatita apresentam elevados teores de Sr e, na primeira, de ETR. Também podem ocorrer carbonatos (inclusive ricos em ETR), serpentina, witherita e norsethita.

Os orangeítos se diferenciam dos kimberlitos pela ausência de monticellita, ulvoespinélio magnésiano e das micas barianas da série flogopita-kinoshitalita.

### 3.2.3 - Lamproítos

Esta classe admite ampla variação no que se refere às características geoquímicas, sendo uma classificação que abrange distintos litotipos.

As principais fases minerais são flogopita, tetraferroflogopita, richterita, olivina forsterítica, diopsídio, leucita e sanidina, as quais podem apresentar variações nos seus teores de óxidos. Um lamproíto não necessariamente deve ter todas as fases acima citadas, porém a caracterização geoquímica de elementos maiores e menores é essencial para a correta classificação desse grupo de rochas.

Litogeoquimicamente, os lamproítos apresentam assinatura ultrapotássica ( $K_2O/Na_2O$  molar > 3), perpotássica ( $K_2O/Al_2O_3$  molar > 0,8) e peralcalina [ $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3 > 1$ ].

Tabela 1: Diferenças mineralógicas entre kimberlitos, lamproítos e orangeítos (adaptado de Mitchell, 1995).

		Kimberlitos	Orangeítos	Lamproítos
<i>Olivin</i>	Macrocr.	☑	☑	raro
	Fenocr.	☑	☑	☑
<i>Mica</i>	Macrocr.-Fenocr.	☑, flogopita	☑, flogopita	☑, flogopita a Ti-flogopita
	Matriz	☑, flogopita kinoshitalita	☑, tetraferroflogopita	☑, Ti-tetraferroflogopita
<i>Espinélio</i>		Abundante, Mg-cromita a Mg-ulvoespinélio	raro, Mg-cromita a Ti-magnetita	raro, Mg-cromita a Ti-magnetita
<i>Monticelita</i>		☑	—	—
<i>Diopsídio</i>		—	☑, Al- + Ti-pobre	☑, Al- + Ti-pobre
<i>Perovskita</i>		☑, Sr- + ETR-pobre	raro, Sr- + ETR-rico	raro, Sr- + ETR-rico
<i>Apatita</i>		☑, Sr- + ETR-pobre	abundante, Sr- + ETR-rico	☑, Sr- + ETR-rico
<i>Calcita</i>		abundante	☑	—
<i>Sanidina</i>		—	Raro, na matriz	☑, fenocristais + matriz
<i>K-richterita</i>		—	Raro, na matriz	☑, fenocristais + matriz
<i>K-Ba-titanatos</i>		muito raro	☑	☑
<i>Zr-silicatos</i>		muito raro	☑	☑
<i>Mn-ilmenita</i>		raro	☑	muito raro
<i>Leucita</i>		—	raros pseudomorfos	☑ fenocristais

### 3.2.4 - Lamprófiros

Este termo abrange um grande número de rochas, e é definida mineralógica e texturalmente pela presença de fenocristais de mica e/ou anfibólio, em matriz que pode conter plagioclásio, K-feldspato, feldspatóide, carbonato, monticellita, melilita, mica, anfibólio, piroxênio, perovskita óxidos de Fe-Ti e vidro.

### 3.2.5 - Kamafugitos

É um termo que agrupa três litotipos: **katungitos**, **mafuritos** e **uganditos**.

A figura 3.3 indica a classificação de Sahama (1974), diferenciando a composição modal dos Kamafugitos.

Segundo Edgar (1996), os kamafugitos têm altos teores de K e baixos de Si, e apresentam como composição mineralógica principal: olivina, melilita e vidro (katungito); olivina, clinopiroxênio e kalsilita (mafuritos); olivina, clinopiroxênio e leucita (uganditos).

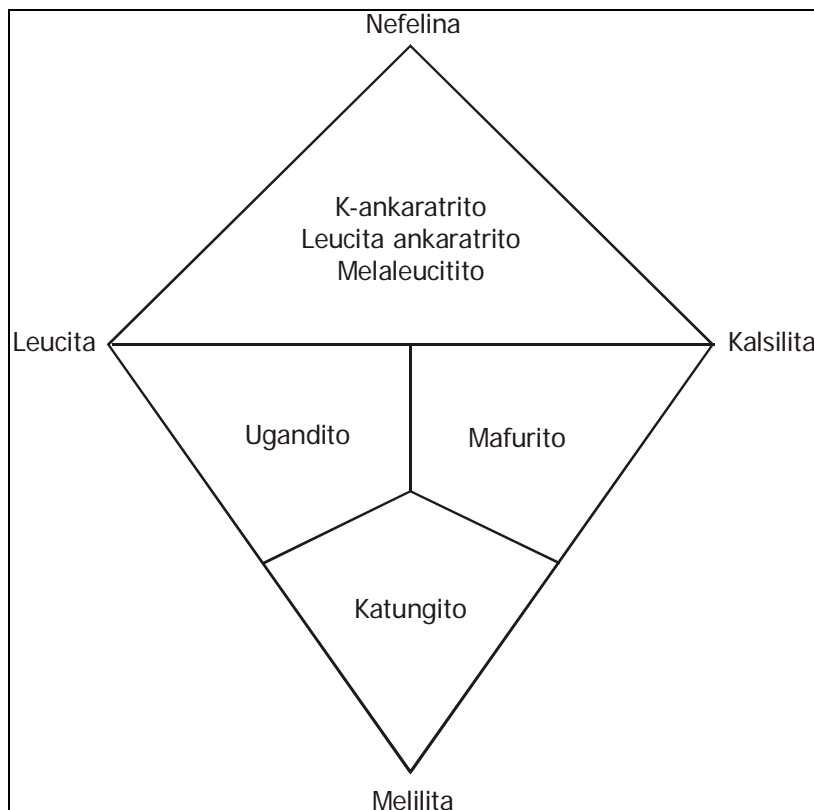


Figura 3.3: Classificação modal dos kamafugitos, adaptado de Sahama (1974).

Sgarbi *et al.* (2000), com base em estudos petrográficos, afirmam que na PAAP só são encontrados mafuritos e uganditos, pois a presença de melilita é restrita e não atinge o campo dos katungitos.

### **3.3 - KIMBERLITOS NA REGIÃO DE COROMANDEL**

Durante vários anos, esta região foi centro de exploração e comercialização de diamantes que na sua maioria eram – e ainda são – extraídos por garimpeiros, uma vez que os depósitos são tipicamente secundários, encontrados em cascalhos e sedimentos fluviais, e como grãos detríticos em rochas do Grupo Areado.

Apesar disso, a descoberta de vários corpos kimberlíticos despertou o interesse na exploração de fontes primárias deste bem mineral no fim dos anos 60. As primeiras descrições e estudos sobre os corpos intrusivos da PAAP se deram nos anos 70 (Barbosa *et al.* 1976). Trabalhos como os de Svisero (1979), Svisero *et al.* (1979, 1980, 1982, 1984, 2004) e Carvalho (1997) também tiveram grande importância para o conhecimento das características petrográficas e químicas das intrusões da região, incluindo análises de química mineral.

Atualmente, a origem dos diamantes encontrados na região ainda é controversa. Alguns autores (Tompkins & Gonzaga, 1989; Gonzaga & Tompkins, 1991; Campos & Gonzaga, 1999) sustentam a teoria de que os eventos glaciogênicos formadores dos grupos Macaúbas e Santa Fé teriam dispersado os diamantes provenientes da região de Diamantina, tendo como meio de transporte os tilitos e diamictitos. Os sistemas fluviais que se instalaram a partir do Cretáceo seriam os responsáveis por concentrar novamente os diamantes. Os argumentos empregados para a validação desta proposta são principalmente aspectos relacionados à morfologia dos diamantes, pois a grande ocorrência de diamantes de qualidade gemológica, com faces bem preservadas, sugerem retrabalhamento gerado pelo transporte por grandes distâncias.

No entanto, outros pesquisadores (Carvalho, 1997; Svisero *et al.*, 2004; Sgarbi *et al.*, 2001) defendem a possibilidade da presença de corpos intrusivos da própria província como fornecedores das gemas encontradas na região. Estes autores se baseiam principalmente em dados de termobarometria obtidos em minerais de corpos da PAAP

que comprovam a existência de massa cratônica sob a área da PAAP com profundidade suficiente para atingir a zona de estabilidade do diamante (Svisero *et al.*, 2004).

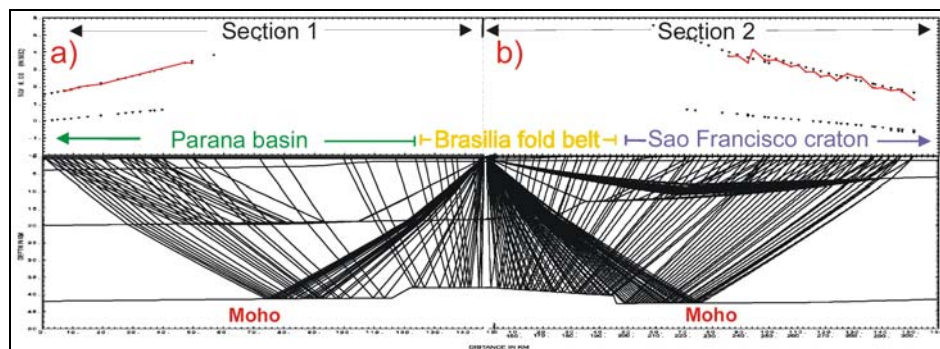
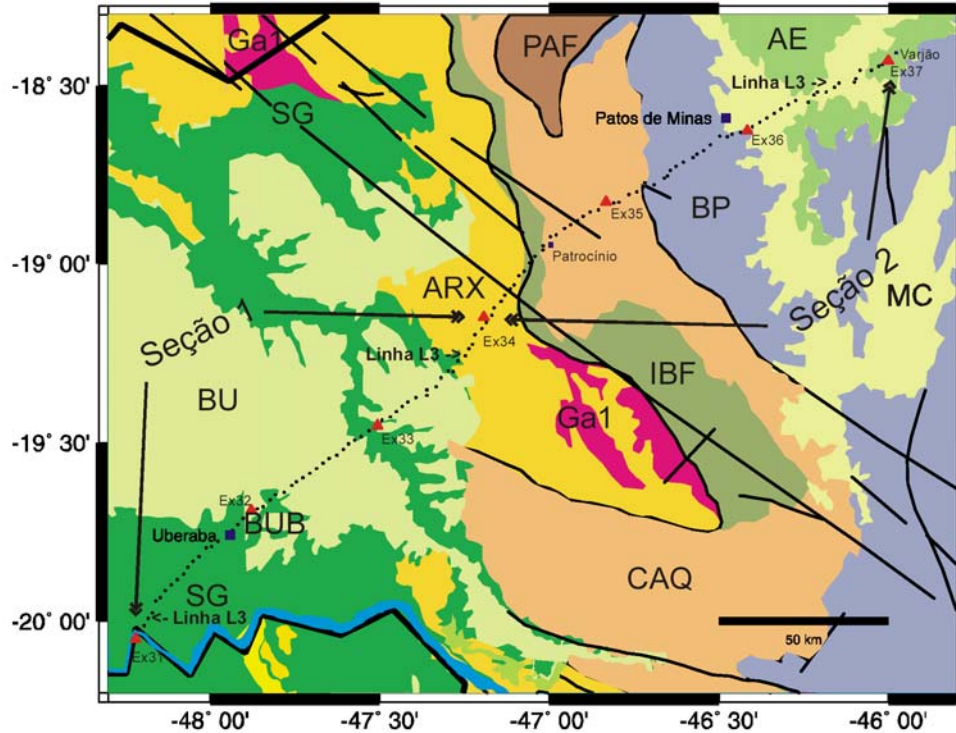


Figura 3.4: Levantamento sísmico na região de Patrocínio-MG: acima, mapa geológico com a localização dos perfis sísmicos; abaixo, perfil modelado das seções (modificado de Perosi & Berrocal, 2003).

Em relação aos limites do cráton, trabalhos recentes sugerem uma redefinição na sua localização. Inicialmente definido por Almeida (1976), os limites do CSF indicavam a região de Coromandel como não favorável à mineralizações primárias de diamantes. Alkmin (1993) redefine esses limites, que chegam a distar mais de 200km do traço

definido anteriormente. Berrocal *et al.* (2004) definem os limites do cráton com base em dados de geofísica. Na região de Coromandel, o limite passa próximo à cidade de Patrocínio-MG, localizada a sul da área de estudo (Perosi & Berrocal, 2003). No trabalho em questão, foram adquiridos dados de refração sísmica em um perfil de aproximadamente 150km e, a despeito dos problemas de aquisição, foi feita uma modelagem na qual é possível identificar o cráton (Figura 3.4).

### **3.4 – MÉTODOS DE PROSPECÇÃO DE KIMBERLITOS**

Inúmeros autores apresentam trabalhos nos quais são descritos detalhadamente os procedimentos e métodos de prospecção e avaliação de potencial em fontes primárias (Costa, 1989; Macnae, 1995; Keating & Sailhac, 2005; Jones & Craven, 2004; Lockhart *et al.*, 2004; Simandl, 2004; Rombouts, 2003; Harvey *et al.*, 2003). As técnicas envolvidas pertencem a diversas áreas das geociências, tais como a geoquímica de minerais pesados, a bioestratigrafia e paleogeografia, as geofísicas regional e local, a geocronologia e integração de dados.

Estudos acadêmicos detalhados e altamente especializados, notadamente na área de petrologia e mineralogia, são essenciais para o desenvolvimento de técnicas de exploração, pois podem auxiliar no entendimento dos processos que influenciam na geração e transporte dos diamantes do manto para a superfície (dentre outros: Carvalho, 1997; Mitchell, 1995; Schulze 2003; Svisero *et al.*, 1977; Svisero, 1979; Svisero, 1995).

Artigos sobre implantação de mina e avaliação de depósitos diamantíferos primários também são comuns (Jakubec, 2004) e abordam diversos aspectos que envolvem os dois assuntos.

Em relação à geofísica, os trabalhos que tratam da prospecção de kimberlitos citam mais freqüentemente os métodos magnetométrico e eletromagnetométrico como principais ferramentas para a localização das intrusões (Haralyi & Svisero, 1984; Macnae, 1995; Power *et al.*, 2004; Fowler *et al.*, 2002). Outros métodos como gravimetria, sísmica, eletrorresistividade e GPR também são citados, porém para detalhamento e modelamento de corpos/alvos prioritários. A gamaespectrometria não é um método usual na prospecção de kimberlitos, principalmente por causa da sua pequena profundidade de penetração, associada à grande susceptibilidade a variações

em relação à geologia. Isso faz com que este método seja pouco utilizado mesmo que seja para avaliação preliminar das anomalias magnéticas.

Pires *et al.* (2005) apresentam resultados preliminares de um estudo de classificação de dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria para a detecção de corpos intrusivos na região de Coromandel, sendo um dos poucos que tratam da resposta gamaespectrométrica dos kimberlitos e rochas associadas.

Interessante notar que quase todos os trabalhos relacionados à prospecção, avaliação e exploração de fontes primárias de diamante ressaltam a necessidade da avaliação do contexto regional e principalmente local para que se obtenha sucesso no descobrimento de novas jazidas de diamante. Esse fato advém da enorme variação litogeoquímica que os kimberlitos e as rochas associadas apresentam, o que implica na impossibilidade de se criar um padrão universal ou modelo de aproveitamento econômico destas rochas.

Assim, observando o contexto geológico da Província Alcalina do Alto Paranaíba, propõe-se neste trabalho um método de avaliação preliminar, por meio da gamaespectrometria, de alvos kimberlíticos com o objetivo de priorizar os corpos propensos à mineralização.

## **Capítulo 4: Materiais, Métodos e Técnicas**

---

## 4. MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

Para a elaboração do presente trabalho, foram utilizados dados geofísicos que passaram por diversos procedimentos para que pudessem ser extraídas as informações necessárias à classificação das intrusões kimberlíticas. Tais procedimentos englobam técnicas de correção e melhoria dos dados, além de métodos estatísticos que permitem a padronização e classificação dos dados.

Aqui serão descritos detalhadamente cada um dos procedimentos que levaram à caracterização e à classificação dos corpos kimberlíticos encontrados na área de estudo. No Anexo II desta dissertação encontram-se os prolegômenos teóricos a respeito dos métodos gamaespectrométrico e magnetométrico.

### 4.1 DADOS DE AEROGEOFÍSICA

Os dados aerogeofísicos utilizados na definição das assinaturas dos corpos kimberlíticos são oriundos do levantamento realizado em 2001 pela então COMIG (Companhia de Mineração de Minas Gerais). São medidas de magnetometria e gamaespectrometria, adquiridas em linhas de produção com direções N30°W e N30°E e altura nominal de voo de 100m, espaçadas de 250m; as linhas de controle foram adquiridas em intervalos de 2.000m.

A Área 1 se localiza na porção noroeste do estado de Minas Gerais, conforme indicado na figura 4.1. A área de estudo é a porção sul da Área 1, com 9.960km<sup>2</sup> e abrange mais da metade da área total do aerolevanteamento, que é de 18.882 km<sup>2</sup>.

O planejamento do levantamento aerogeofísico é muito importante na avaliação dos tipos litológicos a partir da gamaespectrometria. No caso do levantamento da COMIG – Área 1, o espaçamento das linhas de produção (250m) parece ser adequado, pois anomalias gamaespectrométricas estão associadas à localização de corpos conhecidos. No entanto, a detecção gamaespectrométrica é afetada pela rugosidade do terreno e pela altura de voo (IAEA, 2003), o que pode fazer com que algumas anomalias não tenham sido detectadas. Por outro lado, Kontarovich & Tsyganov (1999) sugerem a dispersão de radioelementos sobre uma área extensa em relação aos corpos kimberlíticos de Mirny, o que possibilitaria, em condições específicas, a detecção de anomalias geradas por pequenos corpos.



Para espaçamentos superiores a 250m, a pesquisa pode ser subestimada, uma vez que os corpos podem ter dimensões reduzidas, na ordem de poucas dezenas de metros.



Figura 4.1: Localização das áreas do Levantamento Aerogeofísico da COMIG (Extraído da antiga página eletrônica da COMIG).

No caso da magnetometria, o espaçamento é adequado, porém pode ser menor. Isso se justifica, pois de acordo com o teorema de Nyquist, o menor sinal passível de detecção é o que tem comprimento de onda igual ao dobro do espaçamento da amostragem. Resulta daí que corpos kimberlíticos com anomalia magnética com comprimento de onda menor que 500m não puderam ser corretamente detectados pelo aerolevanteamento em questão.

É interessante observar que a relação entre o comprimento de onda da anomalia e a dimensão dos corpos não é direta, pois fatores como susceptibilidade magnética, geometria (forma) e profundidade afetam a resposta magnetométrica do alvo. A partir desta observação, é possível prever que corpos pequenos, mas com anomalia magnética expressiva têm possibilidade de estarem representados nos dados de magnetometria.

A direção dos vãos não é a mais indicada, pois está inclinada 30 graus em relação ao norte. Tal geometria tem menor variação nos dados quando comparados a um voo na direção da declinação magnética, na qual é maior a intensidade do campo magnético (Blakely, 1995).

A despeito da direção de vôo no levantamento COMIG – Área 1 não ser a mais indicada, os dados são de boa qualidade e permitem a extração de produtos refinados, como a amplitude do sinal analítico, derivadas direcionais e gradiente, entre outros.

#### 4.1.1 *Processamento*

Os dados de aerogeofísica foram adquiridos em formato XYZ e tiveram que ser convertidos para o formato de banco de dados do Geosoft (\*.GDB). A partir daí os dados foram analisados e processados.

Todo o processamento feito tem como base as informações geofísicas apresentadas pela empreiteira que realizou o aerolevanteamento (LASA, 2000; 2001). Apesar disso, foi feita uma análise com o objetivo de verificar a qualidade dos procedimentos de pré-processamento e garantir que os dados estivessem em condições de serem processados. Esses procedimentos estão descritos a seguir.

##### 4.1.1.1 – Pré-Processamento

No caso dos dados magnéticos, expressos pelo campo magnético anômalo – campo total medido, corrigido da variação geomagnética diurna e do campo geomagnético de referência (IGRF) –, as informações foram consideradas como válidas após haverem sofrido não só estas correções, mas também, aquela devida aos erros de nivelamento da malha de vôo (distribuição dos erros verificados nos cruzamentos entre perfis de amostragem e de controle, que devem representar o mesmo valor naquele local).

Para o caso dos dados gamaespectrométricos, discriminados nos canais referentes à contagem total e aos radioelementos K, eU e eTh, pressupôs-se que estes já estavam devidamente corrigidos do tempo morto, das variações de energia (estabilização do espectro), dos respectivos níveis das radiações de fundo (*background*), das variações de altura em relação à nominal estabelecida para o projeto, do espalhamento devido ao efeito Compton, além da conversão das leituras relativas (em contagens por segundo – CPS) em termos mR/h (miliRöntgen/hora) para o canal da contagem total, em porcentagem para as indicações do canal do potássio e em termos de micro-equivalentes para as indicações correspondentes aos canais do urânio e do tório.

#### 4.1.1.2 – Análise de Consistência e Interpolação

Inicialmente, foi efetuada a análise de consistência dos dados levantados, no que diz respeito à integridade, nivelamento e posicionamento das linhas de vôo, que foi seguida da etapa de processamento propriamente dita. Os dados aerogeofísicos foram tratados com o aplicativo Oasis Montaj (Geosoft) versão 5.1.8.

Os dados foram submetidos a um controle adicional sobre sua qualidade, usando-se diferença quarta no rastreamento de valores anormais (*spikes*), procurando-se, assim a presença de ruídos e defeitos nas gravações digitais disponibilizadas. A análise foi feita em todos os registros lógicos, que representam a amostragem total.

A análise de consistência revelou boa qualidade nas etapas de pré-processamento realizada pela empresa LASA, de forma que foi possível passar à etapa de interpolação sem a necessidade de correção das informações fornecidas.

A interpolação dos dados foi efetuada para a geração das imagens representativas dos diversos temas – campo magnético anômalo, canais de K, eTh, eU e CT. Foram testados dois métodos de interpolação disponíveis no aplicativo Oasis Montaj – Geosoft: Curvatura Mínima e Interpolação Bi-direcional. Este último apresentou melhor definição e maior correlação espacial dos dados amostrados e foi usado para as interpolações dos dados magnetométricos. Para os dados gamaespectrométricos, foi utilizado o método de curvatura mínima, pois apresentou menor quantidade de ruídos nas imagens.

As malhas foram interpoladas com tamanho de célula igual a 50m, que corresponde a aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do espaçamento das linhas de produção. O algoritmo utilizado para interpolação dos dados gamaespectrométricos permite a aplicação de um filtro passa-baixa no momento da interpolação. Tal filtro foi aplicado duas vezes, no caso das malhas do potássio e do tório, e quatro vezes no caso da malha do urânio. Considerando que os corpos kimberlíticos têm dimensões restritas em superfície e que foi necessária uma melhor visualização do comportamento geofísico dos alvos, todas as malhas foram redimensionadas para células (*pixel*) de 20m.

#### 4.1.1.2 – Micronivelamento

Após a interpolação dos dados, foi feita a correção das imperfeições notadas no nivelamento das malhas de amostragem em cada malha interpolada acima referida, quando da geração das imagens correspondentes. Este procedimento objetivou

homogeneizar a representação espacial de cada um dos campos físicos considerados. Seu uso é essencial pois, por exemplo, o nivelamento convencional dos dados magnéticos, usando linhas de vôo transversais as de medida, sempre deixa algumas imperfeições na representação espacial mencionada.

Para isto fez-se uso de técnicas de micronivelamento (Minty, 1991) e decorrução (Geosoft, 1996). O procedimento usado no micronivelamento consiste, simplificada, em aplicar: (i) um filtro passa-alta (comprimento de onda mínimo do dobro da separação entre as linhas de vôo) na direção perpendicular às linhas de vôo guardando-se o resultado na malha B; (ii) um filtro passa-baixa (comprimento de onda mínimo da ordem do dobro da distância entre as linhas de controle) no dados da malha B, na direção da linha de vôo, guardando-se o resultado em outra malha C (anomalias relativas ao desnivelamento observado) e (iii), subtração dos resultados armazenados na malha C daqueles da malha A, obtendo a malha final micronivelada (Blum, 1999).

#### *4.1.2 – Produtos Gerados*

Depois da etapa de pré-processamento, foram gerados produtos a partir dos dados aerogeofísicos, que estão relacionados a seguir. As imagens relativas a cada canal gamaespectrométrico, assim como as do CMA e da ASA são apresentados no Anexo II.

##### *4.1.2.1 – Gamaespectrometria*

A partir dos dados de gamaespectrometria, foram geradas as imagens dos canais de K, Th e U, que revelam os teores destes radioelementos contidos nos materiais que estão nos primeiros 50cm da superfície. Como produtos complementares, foram geradas as imagens das razões entre os canais (U/Th, U/K e Th/K) e do Modelo Digital de Terreno. O canal de Contagem Total não foi utilizado, pois abrange uma grande faixa do espectro, inclusive os canais dos três radioelementos, e não contribui efetivamente para a caracterização e distinção dos corpos.

As imagens das razões entre canais (U/Th, U/K e Th/K) e do MDT foram utilizadas juntamente com as de K, Th e U para formarem o conjunto de planos de informação gamaespectrométrica.

#### 4.1.2.2 Magnetometria

Apesar da relevância dos diversos produtos que podem ser derivados dos dados magnetométricos – inclinação do sinal analítico, derivadas direcionais do campo anômalo, gradiente horizontal, entre outros – apenas as imagens do Campo Anômalo (CMA) e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) foram utilizadas neste estudo. A primeira foi útil na identificação visual de anomalias dipolares, enquanto a segunda foi utilizada para a caracterização quantitativa dos valores de magnetometria para os corpos. Além disso, a ASA serviu como entrada de dados para detecção automática das anomalias advindas de corpos cilíndricos verticais, a partir da rotina computacional contida no aplicativo Oasis Montaj (Geosoft versão 6.2), descrita detalhadamente no item 4.3.2.

#### 4.1.3 Análise dos Produtos Aerogeofísicos

##### 4.1.3.1 Gamaespectrometria

Na área de estudo, a distribuição dos números digitais da imagem do canal do potássio é tipicamente bimodal (Figura 4.2). Essa distribuição representa na imagem duas áreas bem marcadas do terreno. A oeste, são encontrados baixos valores de potássio, coincidentes com os níveis topográficos mais elevados. A leste, encontram-se áreas topograficamente mais arrasadas. Em relação aos valores, o teor médio obtido pelo canal de potássio (K) foi de 3,08%, muito superior ao teor médio da crosta, de aproximadamente 2,35 % em peso (IAEA, 2003).

O canal do tório, quando comparado com o de potássio, tem valores homogêneos em toda a área de estudo. Porém, o histograma dos valores de eTh apresenta-se de forma assimétrica, tem grande quantidade de valores baixos e assemelha-se a uma distribuição logarítmica (Figura 4.3). O teor médio indicado pela imagem é de 54,2 ppm (eTh).

Tabela 4.1: Valores estatísticos dos canais gamaespectrométricos.

Canal	Min	Max	Média	Desv. Padr
%K	0.029673	11.382850	3.080164	1.265329
ppm eTh	-0.328388	149.347412	54.215463	18.199498
ppm eU	0.849374	24.766781	7.671054	1.409065

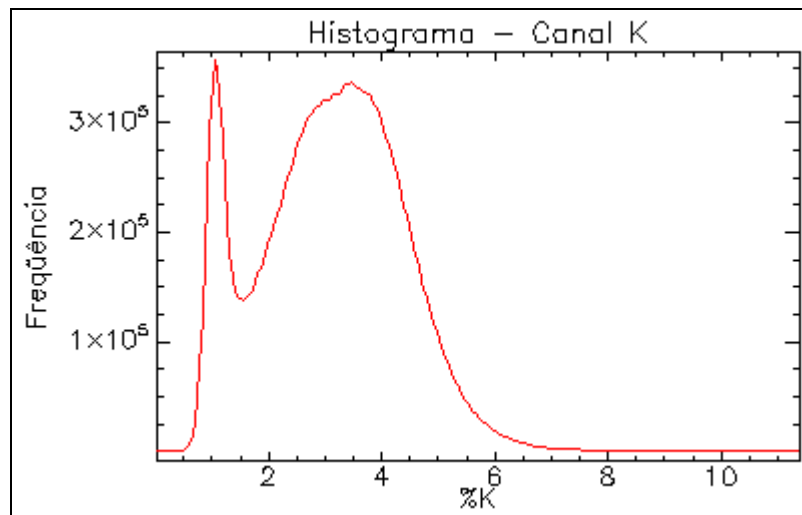


Figura 4.2: Histograma da distribuição dos valores do canal de K.

O canal do urânio apresentou uma distribuição normal (Gaussiana) dos valores na malha que representa a área de estudo (Figura 4.4). Tal distribuição pode indicar melhor dispersão deste elemento na área de estudo, em contraste com a distribuição dos dados de potássio.

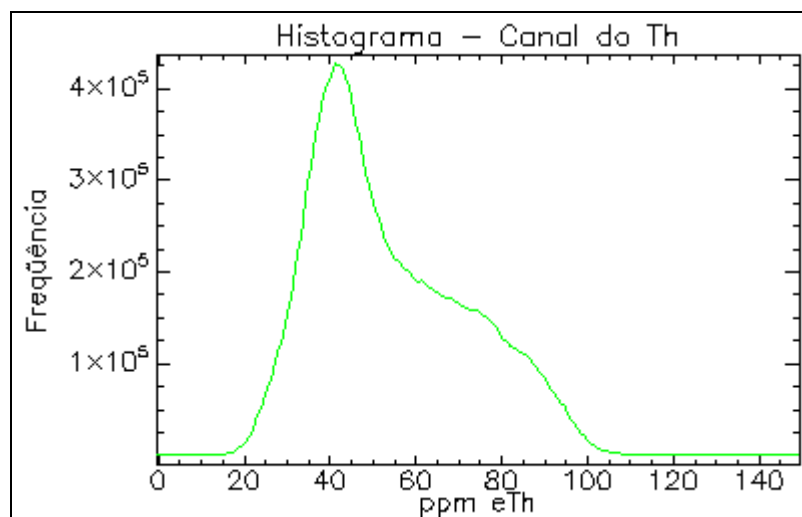


Figura 4.3: Histograma da distribuição dos valores do canal de Th.

Os canais do potássio, do tório e do urânio (K, Th e U, respectivamente), além das razões entre os canais (U/Th, U/K e Th/K) foram utilizados juntamente com a imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) para definição dos perfis que foram traçados, com o objetivo de avaliar a variação destes dados sobre as anomalias relacionadas aos corpos kimberlíticos.

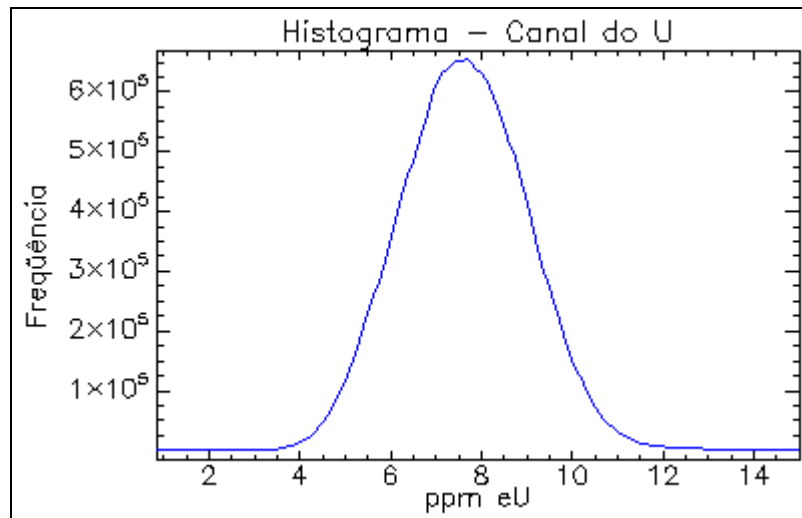


Figura 4.4: Histograma da distribuição dos valores do canal de U.

#### 4.1.3.2 Magnetometria

A área de estudo apresenta uma estruturação magnética marcante, refletindo com grande fidelidade seu arcabouço estrutural. A imagem do Campo Magnético Anômalo (CMA) apresenta inúmeras anomalias dipolares típicas de intrusões ultramáficas, quatro das quais se destacam fortemente. Este produto foi fundamental neste trabalho, pois a partir de sua análise, foi possível identificar e marcar visualmente as anomalias dipolares, que são indicativas das intrusões.

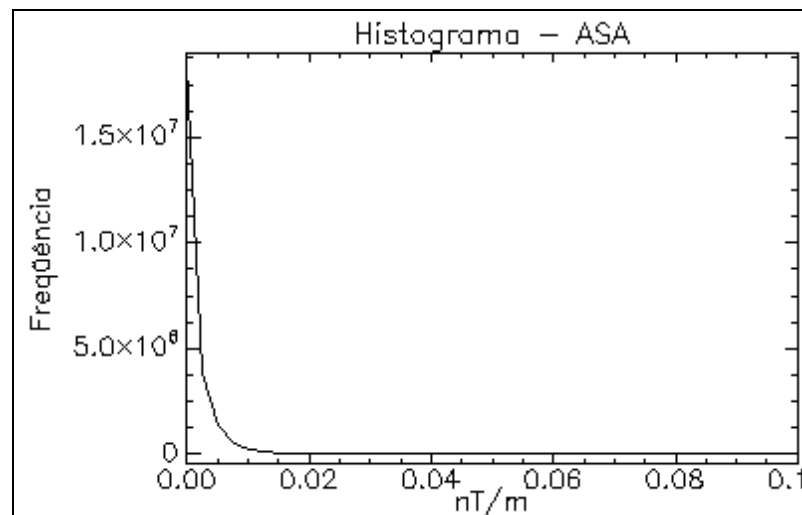


Figura 4.5: Histograma da distribuição dos valores da ASA.

Para a complementação dos planos de informação utilizados na diferenciação dos corpos, se fez necessária a introdução de um produto que fornecesse a informação

magnetométrica dos alvos estudados. Apesar de grande valia para o desenvolvimento deste trabalho, a imagem do CMA não fornece diretamente a amplitude da anomalia, pois se trata da representação de um campo potencial dipolar.

A caracterização magnética a partir do CMA, por conseguinte, seria feita pela medição dos valores pico a pico de cada anomalia, tornando-se um trabalho exaustivo que demandaria muito tempo. Assim, optou-se por utilizar a imagem da Amplitude do Sinal Analítico de Ordem Zero (ASA), produto que, na prática, transforma uma anomalia magnética dipolar em uma anomalia monopolar (considerações teóricas são tratadas no Anexo I desta dissertação). Com isso, é possível obter diretamente da imagem um valor correspondente à magnitude da anomalia.

Dentro da área de estudo os valores da ASA variam de forma assimétrica e apresenta uma distribuição aproximadamente logarítmica dos dados, observada na figura 4.5.

### **4.3 – IDENTIFICAÇÃO DE ANOMALIAS MAGNÉTICAS**

O primeiro passo para a classificação de corpos kimberlíticos na região de Coromandel foi a identificação de anomalias magnéticas geradas pelos mesmos nas imagens de aerogeofísica. Para tanto, foram utilizados dois métodos, um visual e outro automático. Tais métodos são descritos a seguir.

#### *4.3.1 – Detecção visual*

Na região de Coromandel, a interação do campo magnético terrestre com kimberlitos e kamafugitos produz, em superfície, uma anomalia arredondada e bipolar.

A partir da observação da anomalia gerada por intrusões kimberlíticas existentes na área, a imagem do campo magnético anômalo foi rastreada manualmente para que fossem identificadas outras anomalias semelhantes. Ao todo, foram detectadas 374 anomalias magnéticas que apresentaram formato aproximado ao daquelas geradas de corpos conhecidos.

Vale ressaltar que essa detecção é de caráter meramente qualitativo, pois não foi levada em consideração a amplitude da anomalia. Apenas a sua forma foi observada.



#### 4.3.2 – *Detecção Automática*

Segundo Keating (1995) e Keating & Sailhac (2004), a anomalia magnética gerada por um determinado sólido pode ser identificada em uma imagem pela regressão dos resultados da correlação entre uma janela móvel contendo o modelo teórico e a imagem com os dados observados.

Os autores utilizaram um modelo gerado a partir de um cilindro vertical para observar semelhanças sobre uma imagem da ASA (Amplitude do Sinal Analítico) obtida por aerogeofísica. Com isso, foi possível identificar anomalias geradas por kimberlitos em locais ainda não prospectados na área de estudo.

A escolha de um cilindro vertical para a elaboração de um modelo teórico justifica-se pelo fato desta forma ser semelhante à de um kimberlito (Macnae, 1995; Keating, 1995, Cooper & Cowen, 2005). Definida a forma do corpo teórico, os outros fatores que influenciam na forma da anomalia são, principalmente, o contraste de susceptibilidade magnética em relação ao meio onde o corpo se encontra, inclinação e declinação magnéticas, profundidade e dimensões do sólido (Breiner, 1999; Reynolds, 2001; Blakely, 1999; Luiz & Costa e Silva, 1995).

Um algoritmo do aplicativo Geosoft (Oasis Montaj) para detecção de corpos kimberlíticos se baseia nesta teoria e foi utilizado para identificar as anomalias de uma parte da área de estudo. O algoritmo pode ser empregado tanto sobre a imagem do Campo Magnético Anômalo (ou residual), quanto sobre a imagem da ASA, sendo esta última a escolhida para este estudo.

A área selecionada para o processamento do método automático foi reduzida por motivos de otimização do tempo de processamento, pois o tamanho da célula e a extensão da área original de trabalho solicitam muito para a utilização do algoritmo.

O algoritmo inicialmente solicita a entrada de dados do cilindro e do campo magnético da área de estudo para gerar um modelo teórico de um kimberlito. Os dados solicitados são os que seguem.

- Tamanho da célula em metros
- Inclinação magnética em graus decimais
- Declinação magnética em graus decimais
- Fator de escala da magnetização
- Distância entre o topo do cilindro e o sensor

- Comprimento do cilindro
- Raio do cilindro
- Tamanho da janela de busca

De posse destas informações, o modelo é gerado e depois comparado com a imagem da informação magnética do terreno (CMA ou ASA). A comparação é feita por meio de janela móvel ou de busca e os resultados são obtidos a partir de regressão simples. Os parâmetros que controlam os resultados são os listados abaixo.

- Número de aplicações do filtro Hanning (passa-baixa)
- Limiar de correlação
- Amplitude da imagem

O filtro Hanning é utilizado para reduzir os sinais de alta frequência, que podem aumentar o número de resultados obtidos, que se dão na forma de pontos agrupados sobre as anomalias detectadas. O limiar de correlação também controla o número de resultados, sendo expressa sob forma de valores entre 0 e 1 (ou 0 e 100%).

A Tabela 4.2 apresenta os dados relativos ao campo magnético na região de estudo, à época do levantamento.

Tabela 4.2: Parâmetros do campo magnético utilizados para modelagem.

Latitude	-18° 33' 46''
Longitude	-47° 9' 54''
Elevação	700.00 m
Declinação em 17/07/2001	-19° 56'
Inclinação em 17/07/2001	-25° 58'

Como resultado desta análise, o algoritmo gera um banco de dados com os seguintes canais (Geosoft, 2003):

- X = Coordenada X da solução
- Y = Coordenada Y da solução
- Corr\_coeff = coeficiente de correlação, em %
- Pos\_coeff = coeficiente de correlação, em %, se positivo
- Neg\_coeff = coeficiente de correlação, em %, se negativo
- Norm\_error = erro padrão do ajuste, em %
- Amplitude = amplitude da anomalia (nT, se CMA ou nT/m, se ASA)

Com estes resultados, é possível avaliar a relevância dos alvos indicados pelo processamento, uma vez que o erro padrão e o coeficiente de correlação podem ser indicativos de alvos mais prováveis.

Os valores negativos de correlação (Neg\_Coeff) são resultados de fontes reversamente magnetizadas e podem também indicar corpos kimberlíticos (Geosoft, 2003).

É importante ressaltar que os resultados podem ser falseados, pois dependendo dos litotipos e das estruturas geológicas que se encontram no local, podem ser geradas anomalias semelhantes e que não têm como causa a presença de corpos kimberlíticos. Por outro lado, corpos kimberlíticos com geometria muito diferente de um cilindro podem não ser detectados por essa técnica. Por isso se faz necessária uma análise criteriosa dos resultados para que sejam reduzidas as possibilidades de fracasso na aplicação da mesma (Geosoft, 2003). O uso da gamaespectrometria também pode auxiliar na otimização dos alvos encontrados por esse método.

#### **4.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Foram utilizadas técnicas e métodos estatísticos para a preparação dos produtos gerados, para a classificação e avaliação dos resultados.

##### *4.4.1 – Preparação dos Produtos*

Os dados gamaespetrométricos e magnetométricos apresentam valores com grande variância, além de estarem com ordens de grandeza muito distintas umas das outras. Como exemplo, os valores do canal de Th variam de próximo de zero até 140 ppm eTh, enquanto os da ASA estão entre 0,000005 e 0.66 nT/m. Independentemente da unidade, tal incompatibilidade nas dimensões dos valores pode gerar resultados tendenciosos ou imprecisos quando da aplicação dos métodos estatísticos de classificação.

Para reduzir a possibilidade de falseamento dos resultados, decidiu-se pela normalização dos produtos, a partir da seguinte equação:

$$x_n = \frac{x - \bar{x}}{s},$$

onde:

- $x_n$  = valor normalizado;
- $x$  = valores da imagem original;
- $\bar{x}$  = valor médio da imagem original;
- $s$  = desvio padrão da imagem original.

Com isso, o valor médio de cada produto fica próximo de zero, enquanto o desvio padrão passa a assumir valor próximo de 1. Normalizando todos os produtos desta forma, estes passam a ter valores com dimensões semelhantes. Esses resultados podem ser observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores estatísticos para as imagens normalizadas.

<b>Imagem</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Média</b>	<b>Desv. Padr.</b>
%K	-2.410825	6.561685	0.000003	1.000000
ppm eTh	-2.996997	5.227174	0.000000	1.000000
ppm eU	-4.841279	12.132677	0.000003	1.000000
Th/K	-1.073604	128.549423	0.000000	1.000000
U/K	-1.336280	128.547897	0.000000	1.000000
U/Th	-518.557678	1026.941284	-0.000186	1.048765
ASA	5.305352	5.957931	0.000001	1.000001

#### 4.4.2 – Análise de Grupos (Médias-K)

Nas geociências é freqüente a necessidade de se discretizar dados contínuos, ou seja, agrupar os valores em intervalos semelhantes de forma a observar o comportamento de um conjunto de dados e suas relações com os demais conjuntos.

Dentre as diversas técnicas existentes, foi escolhida a Médias-K como tentativa de se encontrar um padrão de valores gamaespectrométricos e magnetométricos para a distinção dos dois grupos de rochas intrusivas (kimberlitos e kamafugitos) existentes na região de Coromandel-MG.

A classificação por Médias-K agrupa amostras com base em características comuns. Aqui, as amostras são os corpos conhecidos e as características são os valores sobre os produtos geofísicos que cada um apresenta.

Dos 54 corpos indicados na Folha SE-23 (CPRM, 2004), 17 apresentaram feições gamaespectrométricas anômalas, observadas nas imagens. Assim, os corpos anômalos foram classificados em kimberlitos e kamafugitos, tomando-se como

referência quatro corpos (dois kamafugitos e dois kimberlitos) dos seis estudados por Araujo (2000) que se encontram dentro da área.

O resultado desta classificação serviu como entrada de dados para a Análise Discriminante, que foi empregada na distinção dos dois conjuntos de anomalias, as detectadas visualmente e as detectadas automaticamente.

#### *4.4.3 – Análise Discriminante*

A Análise Discriminante é uma técnica que oferece a possibilidade de se criar uma função a partir da qual se pode definir se uma determinada amostra pertence a um ou outro grupo, com base nas variáveis que esta apresenta.

No caso do presente trabalho, os dois grupos conhecidos são o dos kimberlitos e o dos mafuritos. Suas características foram definidas pelos valores classificados por Médias-K, observados em cada produto geofísico nos quatro corpos utilizados como padrão. Assim, foi calculada uma função, na qual cada um dos sete produtos geofísicos gerados – K, Th, U, Th/K, U/K, U/Th e ASA – representa um coeficiente da função discriminante. De posse desta função, cada nova amostra que apresente os valores para as mesmas variáveis pode ser alocada em um ou outro grupo.

Assim, foram efetuados dois processamentos de Análise Discriminante, um para cada conjunto de anomalias magnéticas.

## **4.2 GEOFÍSICA TERRESTRE**

Com intuito de confirmar o posicionamento dos corpos estudados por Araújo (2000), foram realizados diversos perfis magnetométricos sobre os pontos indicados na carta geológica ao milionésimo (CPRM, 2004). O posicionamento dos corpos foi confirmado pelas anomalias dipolares observadas nos perfis, o que garantiu a boa amostragem dos corpos que serviram como referência para a classificação das outras intrusões.

Foi utilizado um magnetômetro de precessão protônica, do fabricante Geometrics, modelo G-856. Nos primeiros perfis, foi utilizada a configuração de gradiômetro, que resulta em duas medidas em um mesmo ponto, porém em alturas diferentes. Porém, a partir da linha 7, o rompimento de um cabo impediu que se

continuassem sendo feitas as medidas gradiométricas, o que levou à aquisição de apenas uma leitura por ponto.

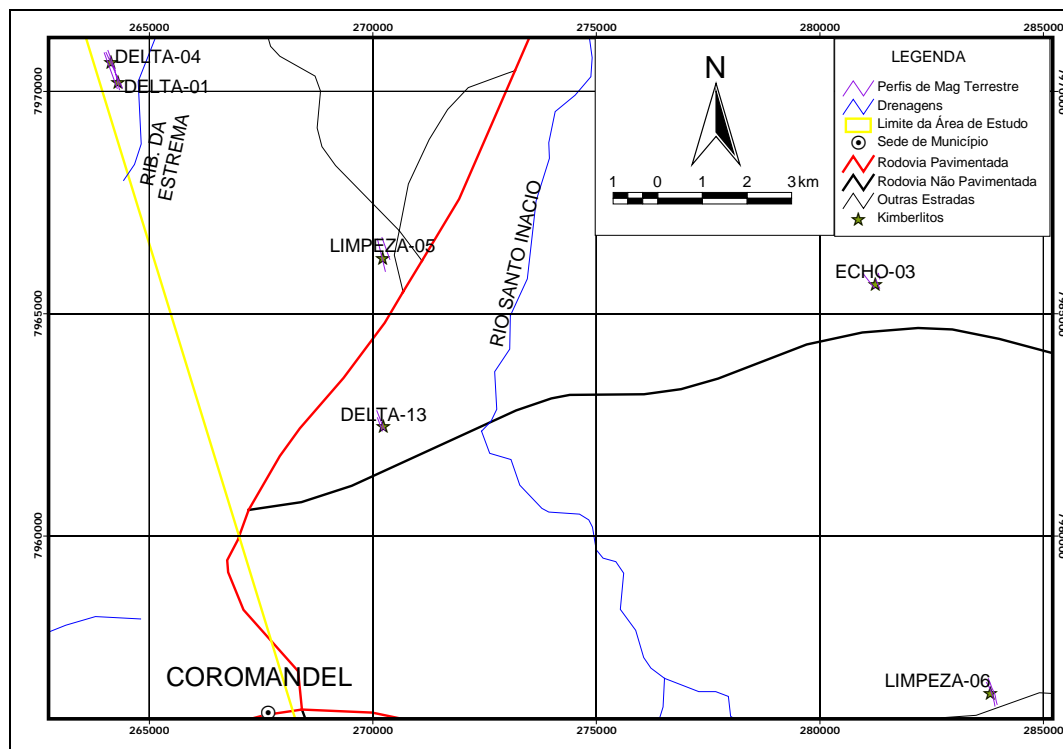


Figura 4.6: Localização dos perfis de magnetometria terrestre realizados sobre os 6 corpos estudados por Araujo (2000).

Ao todo, foram 13 perfis sobre os seis corpos de interesse (Delta-1, Delta-4, Delta-13, Limpeza-5, Limpeza-6 e Echo-3), cujas linhas estão representadas na figura 4.6. Todos os perfis apontaram anomalias dipolares, que foram associadas a corpos kimberlíticos.

Na figura 4.7 é possível observar o perfil magnético realizado sobre os kimberlitos Echo-03 e Delta-01, com magnetômetro terrestre de precessão protônica.

Cada perfil teve início e fim posicionados por meio de GPS absoluto da marca Garmin, modelo 12, com software 4.60. O espaçamento era constante, porém foi feita uma redistribuição dos pontos medidos a partir do número de pontos e do comprimento total do perfil. Assim, foi possível estimar melhor o centro da anomalia medida com o posicionamento dos corpos de referência.

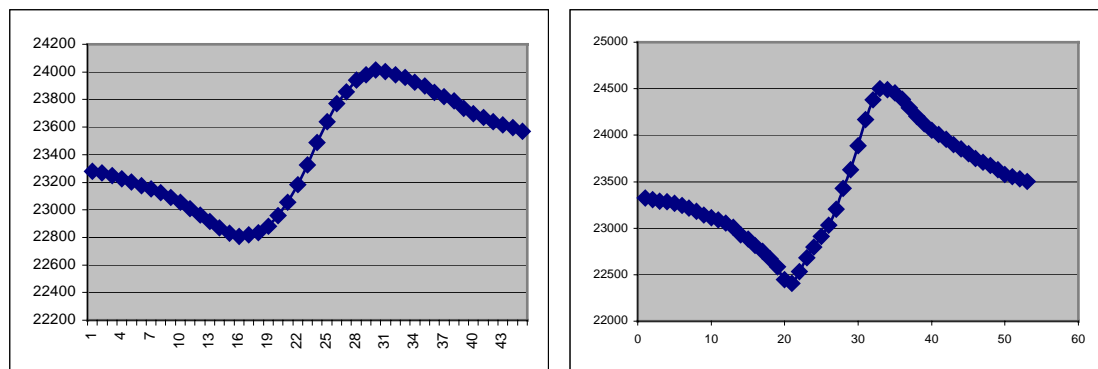


Figura 4.7: Perfis de magnetometria terrestre: (a) Kimberlito Echo-03; (b) Kimberlito Delta-01.

Tal procedimento poderia afetar o posicionamento das anomalias, porém a dimensão das anomalias de interesse (>500m) é muito superior ao espaçamento das estações (~10m).

### 4.3 APLICATIVOS UTILIZADOS

Os aplicativos utilizados são de propriedade de órgãos internos da Universidade de Brasília (UnB) ou de uso livre (*freewares*).

Para processamento dos dados aerogeofísicos, foi utilizado o Oasis Montaj (Geosoft), versão 5.1.8. A identificação de anomalias e alguns processamentos de imagem foram efetuados com o ER Mapper, versão 6.2. A análise estatística dos dados, envolvendo classificação por Médias-K e Análise Discriminante, tiveram como ambiente o aplicativo Statgraphics Plus 4.1. Também foi utilizado o aplicativo Grapher 4 (Golden Software) para avaliação dos perfis. Todos esses aplicativos são de propriedade do Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA-IG).

A interface utilizada para visualização dos resultados em ambiente SIG foi realizada com o aplicativo ArcView, versão 3.3, juntamente com o aplicativo ENVI, v.4.2. O Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial (LABSR-IG) permitiu o uso da licença dos dois aplicativos para a realização dos trabalhos.

Os aplicativos de uso livre que foram utilizados são: Magloc e Mod 3D.

## **Capítulo 5 – Caracterização Geofísica**

---



## 5. CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA

Neste capítulo são apresentados os resultados e a caracterização aerogeofísica dos corpos encontrados na área de estudo. Também são tratadas as limitações do método, uma vez que nem sempre será possível utilizá-lo em outros casos. Algumas observações são essenciais para o desenvolvimento da pesquisa e explicações adicionais podem ser encontradas aqui para a total compreensão do trabalho realizado.

### 5.1 CLASSIFICAÇÃO DE KIMBERLITOS E ROCHAS ASSOCIADAS

Uma das principais referências para classificação de kimberlitos é a de Mitchell (1995), na qual se encontram as definições de rochas kimberlíticas e rochas associadas, com base em geoquímica de rocha total, química mineral e petrografia. Tais rochas são os kimberlitos *strictu sensu*, orangeítos, lamproítos, lamprófiros e kamafugitos.

Porém, nem sempre é possível aplicar esta classificação, por causa da grande variação geoquímica e mineralógica destes litotipos. Apesar disso, Araújo (2000) se baseia nesta classificação e consegue agrupar os tipos litológicos e definir seus fácies (cratera, diatrema e hipoabissal) utilizando petrografia, geoquímica e química mineral. Por utilizar uma mesma metodologia e sendo um trabalho detalhado e bem específico, optou-se por se utilizar a classificação sugerida pela autora, que adapta a classificação de Mitchell (1995) para os corpos da Província Alcalina do Alto Paranaíba.

Seis corpos classificados em dois grupos – kimberlitos e kamafugitos – encontram-se na área do levantamento aerogeofísico, dentre os quais quatro serviram como padrão para as análises das imagens gamaespectrométricas e magnetométricas. A partir destes corpos, foram identificadas as características geofísicas de cada grupo, o que permitiu a classificação de outros corpos conhecidos dentro da área do aerolevanteamento e a verificação de anomalias magnéticas detectadas, tanto visualmente, quanto por processamento digital.

Estudos complementares são necessários para verificar a real eficácia do método, uma vez que não foram feitas as análises sugeridas por Araújo (2000) para a correta classificação dos corpos intrusivos da região. Tais estudos incluem petrografia, geoquímica e química mineral, que fogem do propósito desta dissertação.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DOS ALVOS

Este trabalho apresenta as diferenças detectadas entre corpos kimberlíticos e kamafugíticos a partir da gamaespectrometria e da magnetometria. Isto foi possível graças ao desenvolvimento de um procedimento de integração de dados geofísicos a partir de corpos kimberlíticos conhecidos e da identificação de anomalias magnéticas típicas.

Vale ressaltar que os estudos realizados para a elaboração desta dissertação não obterão necessariamente os mesmos resultados se forem empregados em outras regiões, uma vez que os litotipos hospedeiros das intrusões, assim como as próprias intrusões podem apresentar características geofísicas distintas das que foram apresentadas aqui. Dados adquiridos em outras áreas do Brasil, distintas da região de Coromandel-MG, podem ser utilizados na aplicação do método na forma como está sendo sugerido, desde que sejam observadas as características e restrições geológicas e geofísicas, tanto da área e quanto dos dados.

### 5.2.1 – Magnetometria

Os corpos kimberlíticos têm geometria aproximada à de um cone invertido ou um cilindro vertical e a anomalia magnética gerada por estas formas variam dependendo de alguns fatores. A latitude e o contraste magnético com a rocha encaixante podem ser considerados como os mais importantes.

Na região de estudo, as rochas hospedeiras dos corpos intrusivos têm baixa resposta magnética, o que realça a presença dos mesmos. A anomalia gerada pelos corpos é tipicamente dipolar, quando observadas na imagem do CMA, enquanto na imagem da ASA, estas anomalias são picos monoplares bem destacados (Figura 5.1).

As anomalias apresentam características próprias, que são resultado de diversos fatores de interação do campo magnético terrestre. Por exemplo, uma sutil assimetria pode ser observada na figura 5.2a, que representa a resposta magnetométrica do corpo Limpeza-10. O pólo positivo, a NNW, é mais suave e um pouco maior que o pólo negativo, a SSE, que apresenta dimensões mais restritas. Essa assimetria se deve principalmente à inclinação do campo magnético da região, que está estimado em  $-25^{\circ}58'$  em relação ao plano horizontal.

Outra consequência da configuração do campo magnético da área é a rotação do eixo entre os dois pólos. Na área de estudo, as anomalias estão rotacionadas e posicionam-se na direção ENE, devido à declinação do campo magnético ( $\sim 19^{\circ}56'$  W).

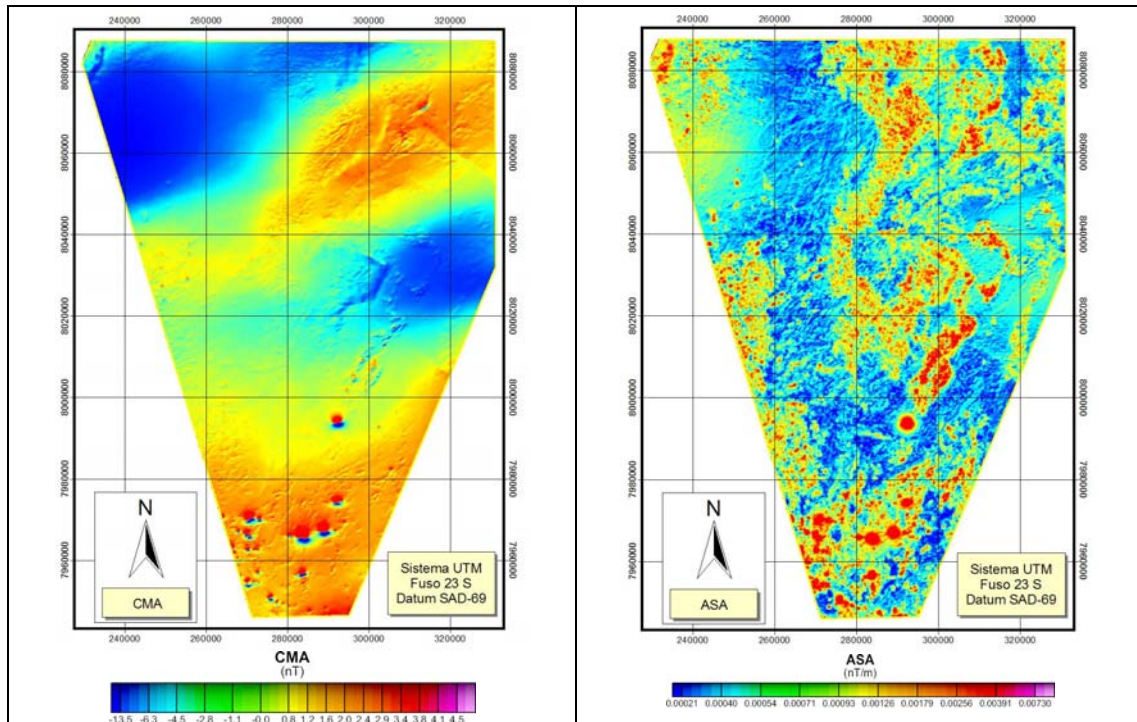


Figura 5.1: Produtos de magnetometria mais relevantes para o estudo: Amplitude do Sinal Analítico (ASA) e Campo Magnético Anômalo (CMA).

Na Figura 5.2b, a mesma anomalia apresenta-se como um pico relativamente suave e com um prolongamento a SW, mais nítido do que na imagem do CMA. A origem desta forma da anomalia pode estar na presença de um corpo adjacente ou na possível geometria irregular do corpo principal.

A dimensão das anomalias magnéticas na área de estudo é bem variada e, apesar de haver anomalias magnéticas extensas – podendo chegar a 4 km de diâmetro aproximado –, existe grande quantidade de corpos cuja anomalia é reduzida, em torno de 500m, que estão compatíveis com o espaçamento do aerolevantamento, de acordo com o que estabelece o teorema da amostragem. Corpos menores poderão existir na área, porém o espaçamento das linhas de vôo (250 m) pode ser restritivo quanto à visualização destes.

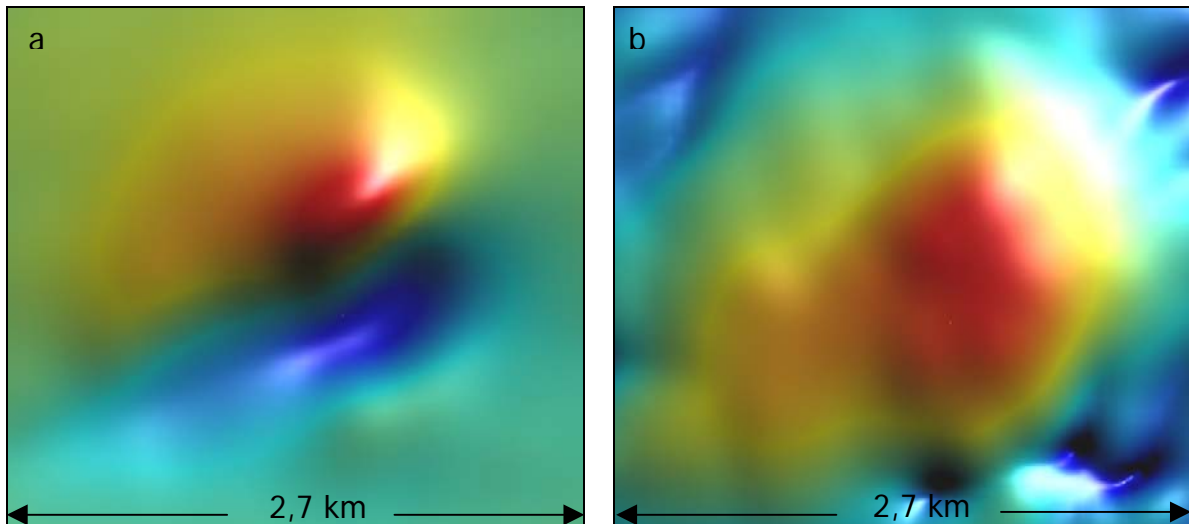


Figura 5.2: Anomalia magnética gerada pelo kamafugito Limpeza-10. (a) Na imagem do CMA, o eixo da anomalia está inclinado e o pólo norte é maior que o sul; (b) A mesma anomalia na imagem da ASA. Detalhes no texto.

A forma das anomalias é geralmente circular ou elíptica, freqüentemente apresentando dois picos. No caso do corpo Vargem-02, é possível observar a presença de três picos magnéticos. Porém, como o espaçamento entre os picos é menor do que 500m, não é possível estabelecer qualquer relação genética segura destes com os corpos.

### 5.2.2 – Gamaespectrometria

Alguns corpos intrusivos conhecidos dentro da área de estudo apresentam anomalias gamaespectrométricas expressivas, como o corpo Limpeza-06. Neste estudo, os produtos mais significativos, no que se refere à caracterização gamaespectrométrica dos corpos, são as imagens dos canais de Th e U (Figura 5.3), nas quais é possível observar em detalhe as anomalias geradas pelos corpos aflorantes. Na imagem do canal do K fica por vezes difícil a associação de valores anômalos às intrusões (Figura 5.4), principalmente por causa da sua grande mobilidade e do baixo contraste com as rochas hospedeiras.

As assinaturas gamaespectrométricas podem ser alteradas por várias causas. Dentre elas, podemos citar a alteração das características do solo por uso de fertilizantes, revolvimento do solo (ex. garimpos) e transporte de material e lixiviação por efeito da topografia.

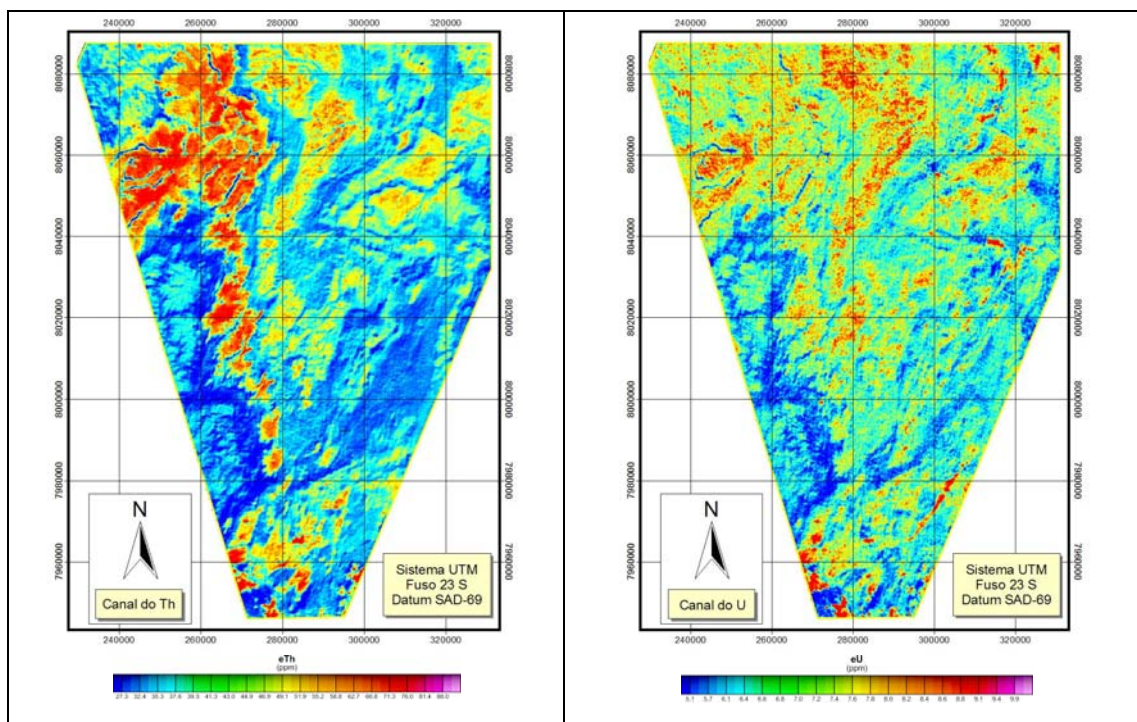


Figura 5.3: Os canais U e Th são os mais relevantes no estudo.

Becegato e Ferreira (2005) apresentam o resultado de análises geofísicas – eletrorresistividade, gamaespectrometria e magnetometria – em solos agrícolas, onde houve uso de fertilizantes. Os autores detectaram um aumento significativo nos teores dos radioelementos K, eTh e eU, o que prejudica a caracterização dos solos originais. Apesar de ter sido feita uma breve análise da área por meio de imagem do sensor ETM+ (satélite Landsat 7), não foi identificada variação gamaespectrométrica considerável que fosse claramente ligada a áreas de cultivo. Portanto, foi desconsiderada tal influência, a despeito da grande atividade agrícola na região.

A análise da topografia com o uso de modelo digital de terreno (MDT) é fundamental para uma boa avaliação das condições do terreno e a possível influência do transporte de solo. Produtos derivados, como mapa de declividade, também auxiliam nesta avaliação.

A partir desta análise, foi possível selecionar os corpos que fizeram parte do conjunto inicial de amostras para a formulação da equação discriminante dos grupos dos kimberlitos e dos kamafugitos.

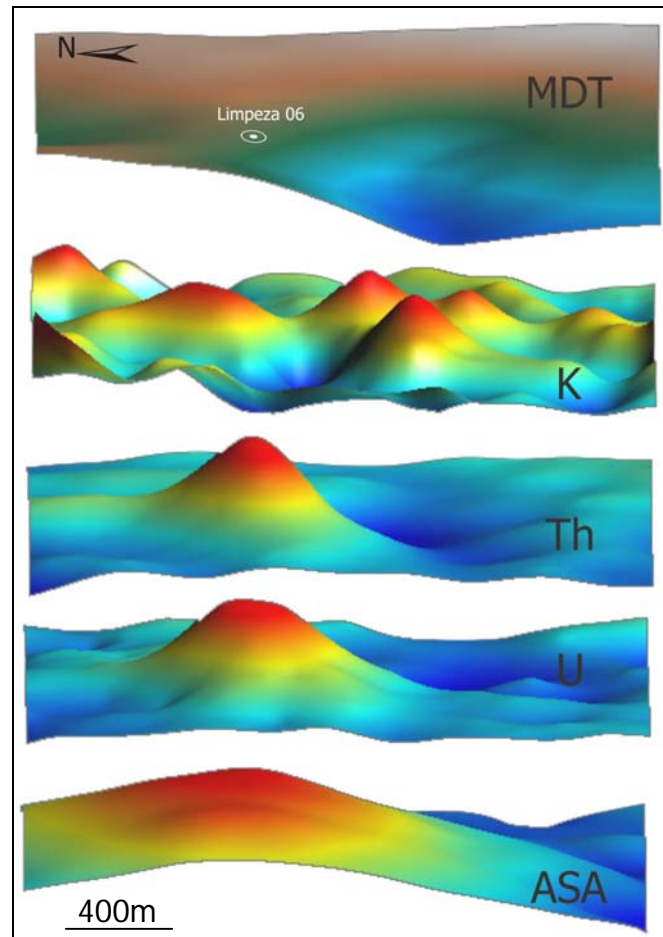


Figura 5.4: Visualização em perspectiva tridimensional das imagens do MDT, dos canais K, Th e U, e da ASA sobre o kamafigito Limpeza-06. Escala aproximada.

Como exemplo de influência da topografia, pode ser citado o caso do corpo Echo-03 (Figura 5.5), descrito por Araujo (2000) como kimberlito e que não apresenta características gamaespectrométricas distintivas entre o grupo de kimberlitos e o de mafuritos. Nas imagens analisadas, não houve distinção conspícua entre o corpo e a rocha encaixante. Isso pode ser o resultado da influência de material transportado, uma vez que este corpo encontra-se próximo a um rio.



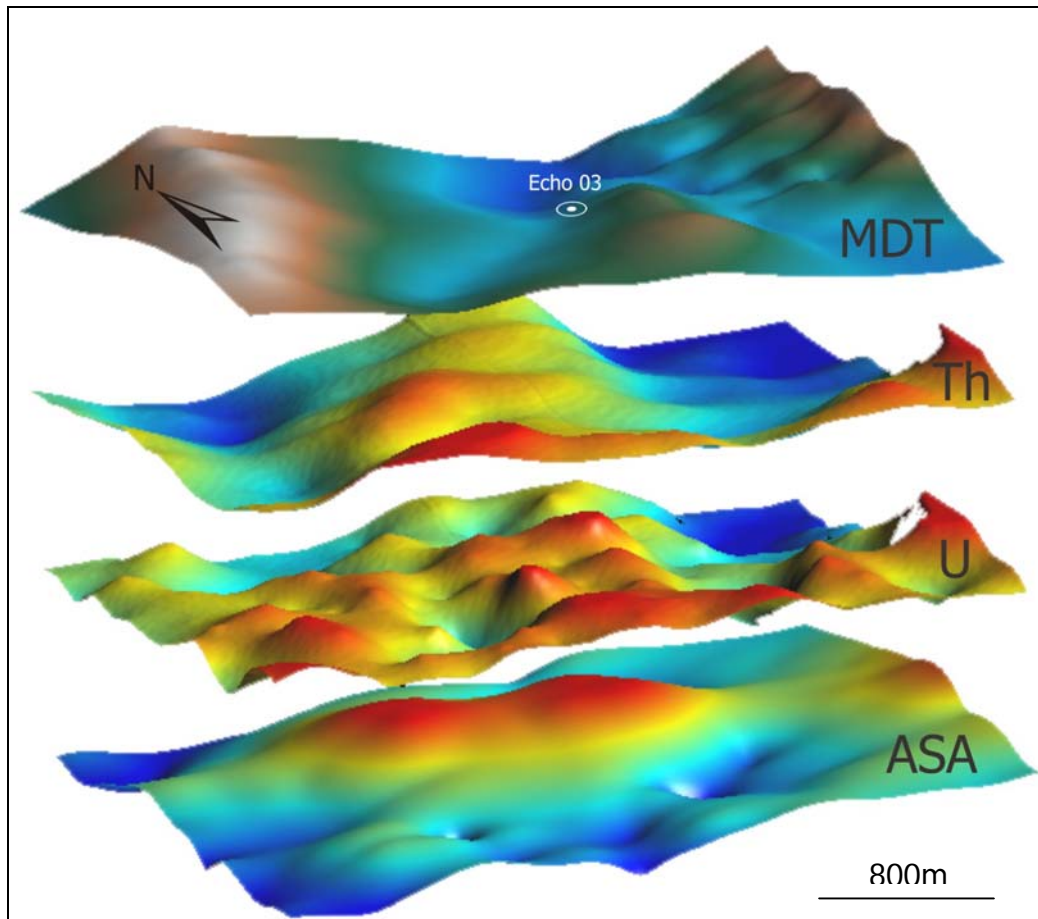


Figura 5.5: Anomalia gamaespectrométrica perturbada no kimberlito Echo-03.

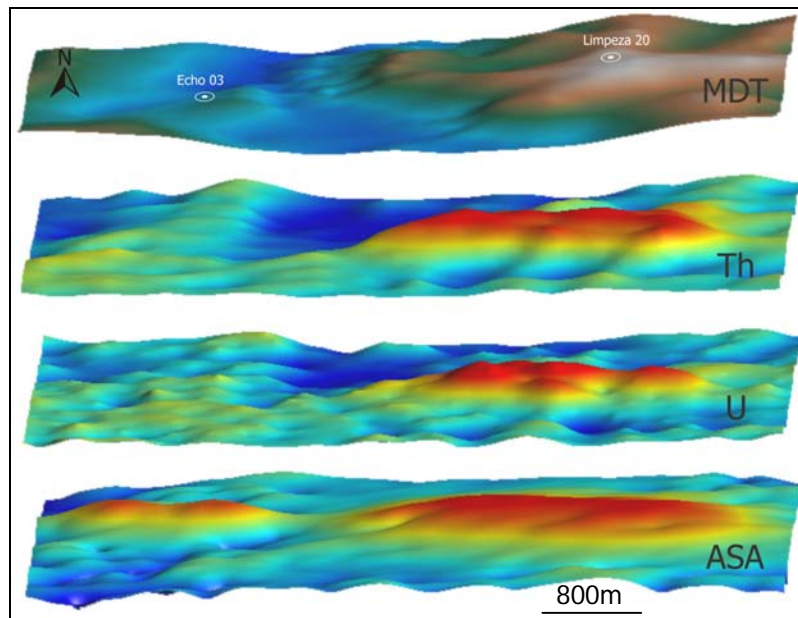


Figura 5.6: Influência topográfica na assinatura gamaespectrométrica. O kimberlito Echo-03 encontra-se próximo a uma drenagem, enquanto o corpo Limpeza-20 está em cota mais elevada.

Próximo a este corpo, uma outra intrusão em cota topográfica superior (Limpeza-20) apresenta anomalia nos canais de Th e U, pois aparentemente está livre de influências de solo alóctone. Neste caso, as anomalias de tório e urânio ficam bem pronunciadas e posicionadas aproximadamente no mesmo local da anomalia da ASA. Tal constatação pode ser observada na figura 5.6.

### **5.3 CLASSIFICAÇÃO DE INTRUSÕES E ANOMALIAS**

#### *5.3.1 Classificação por Médias-K*

Essa classificação foi utilizada com o objetivo de separar em dois grupos os corpos conhecidos que apresentam anomalias gamaespectrométricas expressivas.

Inicialmente, sete produtos foram utilizados para a classificação de cada corpo: os três canais de gamaespectrometria – K, Th e U – e suas três razões – Th/K, U/K e U/Th –, além da ASA, representando a característica magnética dos mesmos.

Observando os corpos que serviram como referência (Tabela 5.1), os valores que mais se distinguem são os teores dos radioelementos eTh e eU. Os do grupo dos kamafugitos (Limpeza-05 e Limpeza-06) têm teores de eTh e eU bem superiores aos do grupo dos kimberlitos (Delta-01 e Delta-04). Os demais valores (K, ASA e razões) não apresentaram, entre os dois grupos, diferenças significativas em termos de valores.

Para os corpos conhecidos que foram amostrados, observa-se uma correlação positiva entre os valores de eTh e eU (Figura 5.7). Esta correlação é mais nítida no grupo dos kimberlitos, onde os pontos projetados encontram-se menos dispersos. Nas imagens, também existe esta correlação, o que indica que o comportamento geoquímico dos dois radioelementos é semelhante na área como um todo.

Os baixos valores de eTh e eU no grupo dos kimberlitos dificultam a identificação de corpos que a ele pertencem, pois seus teores estão abaixo da média da área (valores normalizados menores que zero) e, conseqüentemente, muito próximos dos teores das rochas encaixantes.

De acordo com os resultados da classificação, indicado pela Tabela 5.1, fazem parte do Grupo 1 os corpos definidos como kamafugitos (Limpeza-05 e Limpeza-06) por Araújo (2000), além de outros nove corpos com características geofísicas



semelhantes. O segundo grupo reúne, de forma análoga ao anterior, os dois kimberlitos de referência (Delta-01 e Delta-04) mais oito corpos.

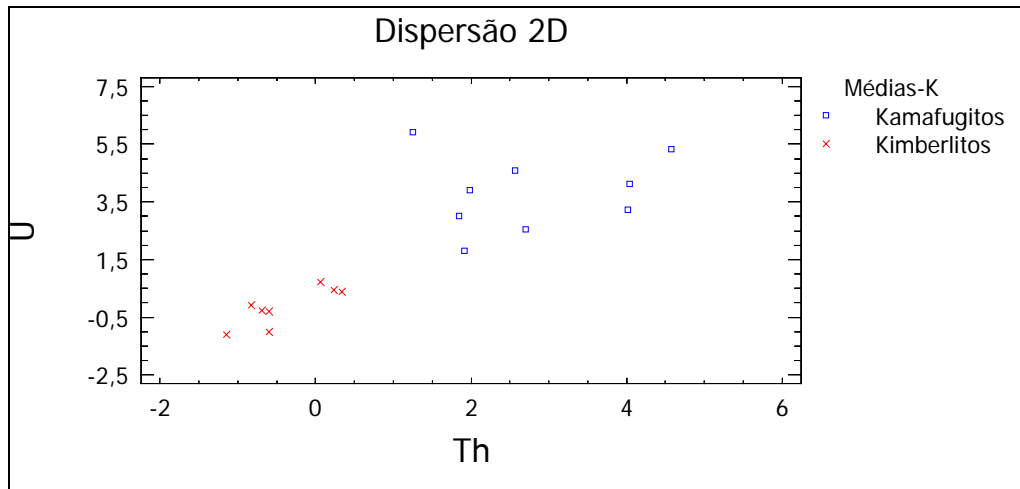


Figura 5.7: Gráfico de dispersão de teores normalizados de eTh e eU para os corpos classificados por Médias-K.

Tabela 5.1: Valores normalizados dos produtos geofísicos obtidos pela amostragem dos corpos conhecidos (CPRM, 2004) e classificados por Médias-K (coluna Tipo). Em negrito, os corpos classificados por Araújo (2000).

Corpo	K	Th	U	Th/K	U/K	U/Th	ASA	Tipo	Dist. 1	Dist. 2	Dist. 3
Echo-01	-1.2253	1.9088	1.8037	1.4206	1.5207	-0.9352	3.9602	Kamafugito	2.2932	2.2057	2.1957
Limpeza-10	-0.6770	4.0433	4.1163	1.3920	1.2482	-1.1772	4.8446	Kamafugito	1.9456	.9920	.9610
<b>Limpeza-05</b>	<b>-0.9709</b>	<b>2.5598</b>	<b>4.5802</b>	<b>1.2625</b>	<b>1.9412</b>	<b>-0.2838</b>	<b>5.0350</b>	<b>Kamafugito</b>	<b>1.4783</b>	1.4187	1.3266
Limpeza-20	-1.2740	4.0108	3.2308	2.6353	2.2491	-1.4170	4.3631	Kamafugito	2.0315	1.6759	1.6415
Limpeza-23	-0.0643	2.7004	2.5371	0.4112	0.2291	-1.0898	4.0195	Kamafugito	2.7143	1.1608	.6414
<b>Limpeza-06</b>	<b>-1.3352</b>	<b>4.5761</b>	<b>5.3106</b>	<b>3.1561</b>	<b>3.3840</b>	<b>-1.0535</b>	<b>5.6013</b>	<b>Kamafugito</b>	<b>3.6434</b>	1.2621	1.2388
Buriti-01	-1.3364	1.8452	3.0101	1.6358	2.3590	-0.3981	2.0013	Kamafugito	2.2845	1.4148	1.4141
Vargem-02	-0.9147	1.2476	5.9059	0.6473	2.2455	1.4606	2.3891	Kamafugito	3.7190	1.4921	1.4695
Vargem-03	-1.3382	1.9880	3.9142	1.7202	2.7710	-0.1358	2.5097	Kamafugito	1.8260	1.5820	1.5803
<b>Delta-04</b>	<b>-0.2474</b>	<b>-0.6031</b>	<b>-0.9998</b>	<b>-0.3918</b>	<b>-0.4274</b>	<b>-0.1628</b>	<b>3.5495</b>	<b>Kimberlito</b>	<b>1.0971</b>	<b>1.5505</b>	1.5344
<b>Delta-01</b>	<b>0.5017</b>	<b>-1.1460</b>	<b>-1.0877</b>	<b>-0.6751</b>	<b>-0.6970</b>	<b>0.8457</b>	<b>3.7222</b>	<b>Kimberlito</b>	<b>1.6003</b>	<b>1.6088</b>	1.2978
Delta-09	-0.9686	-0.8270	-0.0629	-0.1578	0.3784	1.0925	2.6774	Kimberlito	1.5843	2.9386	2.9211
Delta-18	0.2403	-0.6032	-0.3085	-0.5133	-0.4825	0.4172	4.3632	Kimberlito	1.2874	1.5216	1.4819
Echo-06	-0.0746	0.0626	0.7392	-0.2677	-0.1382	0.1608	1.9295	Kimberlito	1.6002	2.2489	2.2258
Limpeza-41	0.2215	0.2357	0.4317	-0.3158	-0.3388	-0.2480	1.8825	Kimberlito	1.6428	2.9676	2.9659
Mascate*	-0.3465	-0.6867	-0.2782	-0.3848	-0.2101	0.6004	4.5999	Kimberlito	1.5559	1.3114	1.1297
StaBarbara	0.6650	0.3417	0.3788	-0.4010	-0.5028	-0.3960	2.4854	Kimberlito	1.4929	1.5919	1.5587

\* Os corpos Mascate 01, 02, 03 e 04 localizam-se no mesmo ponto (CPRM, 2004).

Foram feitos três testes para a classificação dos corpos selecionados, com a finalidade de se observar a influência de cada variável na definição dos grupos. O primeiro, foi executado utilizando-se todos os produtos (K, Th, U, Th/K, U/K, U/Th e ASA). A distância de cada amostra em relação ao centro da classe a que pertence está representada na coluna **Dist. 1** da Tabela 5.1. Utilizando-se apenas os canais gamaespectrométricos e a ASA, os valores de distância são sensivelmente reduzidos, no caso dos kamafugitos, enquanto para os kimberlitos, este valor aumentou. No entanto, quando se utilizam apenas os canais U e Th, além da ASA, os valores de distância

diminuem consideravelmente para os dois grupos. Este fato pode ser atribuído à dependência linear observada entre os canais originais e as suas razões, além da ausência de anomalia evidente do radioelemento K sobre os corpos intrusivos. Importante observar que a classificação das amostras nos dois grupos não foi alterada com as diversas seleções de variáveis, permanecendo aquela observada na Tabela 5.1.

### *5.3.2 Análise Discriminante*

Depois de definidos os grupos para os 17 corpos selecionados, foi efetuada a Análise Discriminante para a criação de uma função que pudesse classificar os demais corpos e anomalias magnéticas.

Para os dois conjuntos de anomalias (manualmente e automaticamente identificadas), alguns dos escores mais altos foram obtidos por anomalias coincidentes com corpos já conhecidos, mas que não foram selecionados para a classificação por Médias-K. Isso demonstra que a definição dos grupos pela Análise Discriminante foi eficiente na identificação e separação das feições geofísicas dos grupos, apesar deles não apresentarem anomalias gamaespectrométricas conspícuas.

Os resultados obtidos pela classificação dos dois conjuntos de amostras estão descritos a seguir.

#### *5.3.2.1 Seleção Visual de Anomalias Magnéticas*

O método visual identificou 441 anomalias em toda a área de estudo e foi executado a partir da imagem do CMA (Campo Magnético Anômalo). As anomalias foram marcadas com um ponto entre o dipolo e tiveram uma numeração seqüencial definida, de forma que cada um deles recebesse um identificador exclusivo.

A Tabela 5.2 apresenta os 60 escores mais elevados resultantes da classificação por Análise Discriminante. São mostrados os maiores escores tanto para os corpos conhecidos, quanto para as anomalias detectadas pelo método visual. O resultado total da classificação pode ser visto na figura 5.8.

O grande número de anomalias classificadas como kimberlito se deve provavelmente ao fato dos valores de eTh e eU deste grupo serem muito baixos. Desta

forma, os alvos que não apresentam valores muito altos, são classificados como kimberlito, o que pode não ter correlação com os corpos.

Tabela 5.2: Valores normalizados e maiores escores para classificação por Análise Discriminante dos corpos e anomalias detectadas visualmente. Anomalias em destaque coincidem com corpos conhecidos (CPRM, 2004), mas que não foram utilizados como referência para classificação.

NOME	GRUPO	ESCORE	K	Th	U	Th/K	U/K	U/Th	ASA
Limpeza-06	Kamaf	24.28	-1.34	4.58	5.31	3.16	3.38	-1.05	5.60
Anom 373	Kamaf	23.98	-1.27	4.41	5.21	2.83	3.07	-1.02	5.66
Limpeza-05	Kamaf	18.67	-0.97	2.56	4.58	1.26	1.94	-0.28	5.04
Limpeza-10	Kamaf	17.44	-0.68	4.04	4.12	1.39	1.25	-1.18	4.84
Anom 292	Kamaf	15.62	-0.57	3.80	3.50	1.17	0.93	-1.26	5.03
Vargem-02	Kamaf	14.87	-0.91	1.25	5.91	0.65	2.25	1.46	2.39
Anom 436	Kamaf	13.65	-0.85	1.13	5.65	0.53	2.02	1.49	2.31
Anom 440	Kamaf	12.91	-1.15	1.43	4.40	1.05	2.34	0.56	3.53
Limpeza-20	Kamaf	12.85	-1.27	4.01	3.23	2.64	2.25	-1.42	4.36
Anom 321	Kamaf	12.41	-0.88	2.25	2.88	1.01	1.21	-0.72	5.04
Anom 311	Kamaf	12.37	-1.37	4.02	3.04	2.98	2.50	-1.48	4.43
Anom 164	Kimber	12.29	0.23	0.46	1.40	-0.27	-0.16	0.08	5.94
Anom 310	Kamaf	11.72	-0.21	3.40	2.92	0.70	0.42	-1.28	4.50
Anom 396	Kamaf	11.46	-0.84	1.16	4.40	0.54	1.61	0.85	3.10
Anom 323	Kamaf	11.15	-1.08	2.01	2.80	1.21	1.57	-0.60	4.77
Mascate	Kimber	9.57	-0.35	-0.69	-0.28	-0.38	-0.21	0.60	4.60
Anom 415	Kimber	9.32	-0.30	-0.96	-0.45	-0.48	-0.28	1.04	4.36
Anom 425	Kamaf	8.96	-0.19	0.80	4.10	-0.03	0.66	1.15	2.69
Delta-18	Kimber	8.63	0.24	-0.60	-0.31	-0.51	-0.48	0.42	4.36
Vargem-03	Kamaf	8.57	-1.34	1.99	3.91	1.72	2.77	-0.14	2.51
Limpeza-23	Kamaf	8.49	-0.06	2.70	2.54	0.41	0.23	-1.09	4.02
Anom 422	Kamaf	8.42	-0.54	0.88	4.10	0.19	1.05	1.04	2.48
Anom 306	Kimber	8.38	-0.02	-0.45	-0.08	-0.42	-0.33	0.34	4.34
Anom 439	Kamaf	8.17	-0.90	1.02	4.21	0.54	1.67	0.92	2.23
Anom 383	Kamaf	8.16	-1.13	3.47	3.15	1.97	1.81	-1.24	2.97
Anom 433	Kamaf	8.02	-0.97	1.06	4.82	0.63	2.02	1.17	1.41
Anom 319	Kimber	7.62	0.57	-0.17	0.00	-0.48	-0.54	-0.03	4.28
Delta-01	Kimber	7.32	0.50	-1.15	-1.09	-0.68	-0.70	0.85	3.72
Anom 289	Kimber	6.97	0.45	-1.17	-1.18	-0.67	-0.70	0.82	3.61
Anom 393	Kamaf	6.97	-0.95	2.86	2.90	1.35	1.34	-1.04	3.01
Anom 294	Kimber	6.38	-1.29	1.41	0.75	1.29	1.23	-1.08	4.88
Anom 258	Kimber	5.84	-1.32	1.59	1.46	1.47	1.63	-0.88	4.67
Anom 437	Kamaf	5.81	-1.06	1.25	3.93	0.83	1.93	0.53	1.70
Anom 254	Kamaf	5.81	-1.46	2.12	1.93	2.14	2.28	-1.01	3.97
Anom 434	Kimber	5.74	-0.19	-0.60	-0.01	-0.41	-0.23	0.66	3.36
Delta-04	Kimber	5.62	-0.25	-0.60	-1.00	-0.39	-0.43	-0.16	3.55
Anom 356	Kamaf	5.50	-0.43	0.56	2.82	0.02	0.60	0.77	3.13
Anom 206	Kimber	5.50	1.46	-0.86	-1.11	-0.72	-0.88	0.19	3.34
Anom 340	Kamaf	5.46	-1.20	3.61	2.76	2.21	1.83	-1.41	2.49
Anom 432	Kamaf	5.43	-0.48	1.02	3.21	0.19	0.75	0.42	2.52
Anom 428	Kimber	5.21	-0.50	-0.83	-0.91	-0.38	-0.27	0.32	3.22
Anom 417	Kimber	5.21	-0.10	-1.28	-0.72	-0.61	-0.43	1.66	2.85
Echo-01	Kamaf	5.17	-1.23	1.91	1.80	1.42	1.52	-0.94	3.96
Anom 429	Kamaf	5.09	-0.93	1.73	3.05	0.85	1.34	-0.29	2.44
Anom 345	Kamaf	4.97	-1.36	2.59	2.27	2.13	2.11	-1.13	3.16
Anom 097	Kimber	4.94	-0.39	-0.11	0.80	-0.19	0.08	0.44	3.27
Anom 249	Kamaf	4.82	0.88	0.53	3.02	-0.41	-0.17	0.91	2.65
Anom 324	Kimber	4.64	0.36	0.47	0.78	-0.30	-0.33	-0.30	3.61
Anom 394	Kamaf	4.58	-0.99	1.40	2.63	0.80	1.32	-0.21	2.85
Anom 137	Kimber	4.49	-0.51	-1.44	-1.13	-0.57	-0.32	1.68	2.60
Anom 025	Kimber	4.31	-0.51	-1.26	-1.54	-0.51	-0.43	0.62	2.77
Anom 286	Kimber	4.26	-0.16	-1.21	-1.33	-0.58	-0.54	0.74	2.73
Delta-09	Kimber	4.13	-0.97	-0.83	-0.06	-0.16	0.38	1.09	2.68
Anom 129	Kimber	4.12	0.29	-0.65	-0.90	-0.53	-0.61	0.00	3.00
Anom 141	Kimber	4.07	-0.58	-0.62	-0.86	-0.28	-0.21	-0.01	3.00
Anom 123	Kimber	4.06	0.17	-0.97	-1.28	-0.58	-0.64	0.24	2.84
Anom 021	Kimber	4.04	0.24	-1.13	-1.41	-0.63	-0.68	0.46	2.74
Anom 133	Kimber	3.79	0.94	-0.16	0.25	-0.55	-0.60	0.14	2.99
Buriti-01	Kamaf	3.76	-1.34	1.85	3.01	1.64	2.36	-0.40	2.00
Anom 053	Kimber	3.71	-0.07	-0.39	-0.57	-0.38	-0.41	-0.14	2.99

O aumento no número de intrusões classificadas adequadamente pelo método de Araújo (2000) pode ajudar a melhorar a amostragem de corpos usados como referência e assim refinar a classificação.

Na área próxima aos corpos Vargem-02 e Morunga-01, foi marcada uma anomalia que provavelmente representa uma intrusão e, apesar de não constar da listagem obtida no mapa geológico da CPRM (2004), está em área requerida para diamante no DNPM. Na figura 5.9 é possível observar esta anomalia e visualizar sua correlação espacial com as anomalias dos canais de Th e U, além do comportamento geofísico dos corpos Vargem-01, Vargem-02, Vargem-03 e Morunga-01.

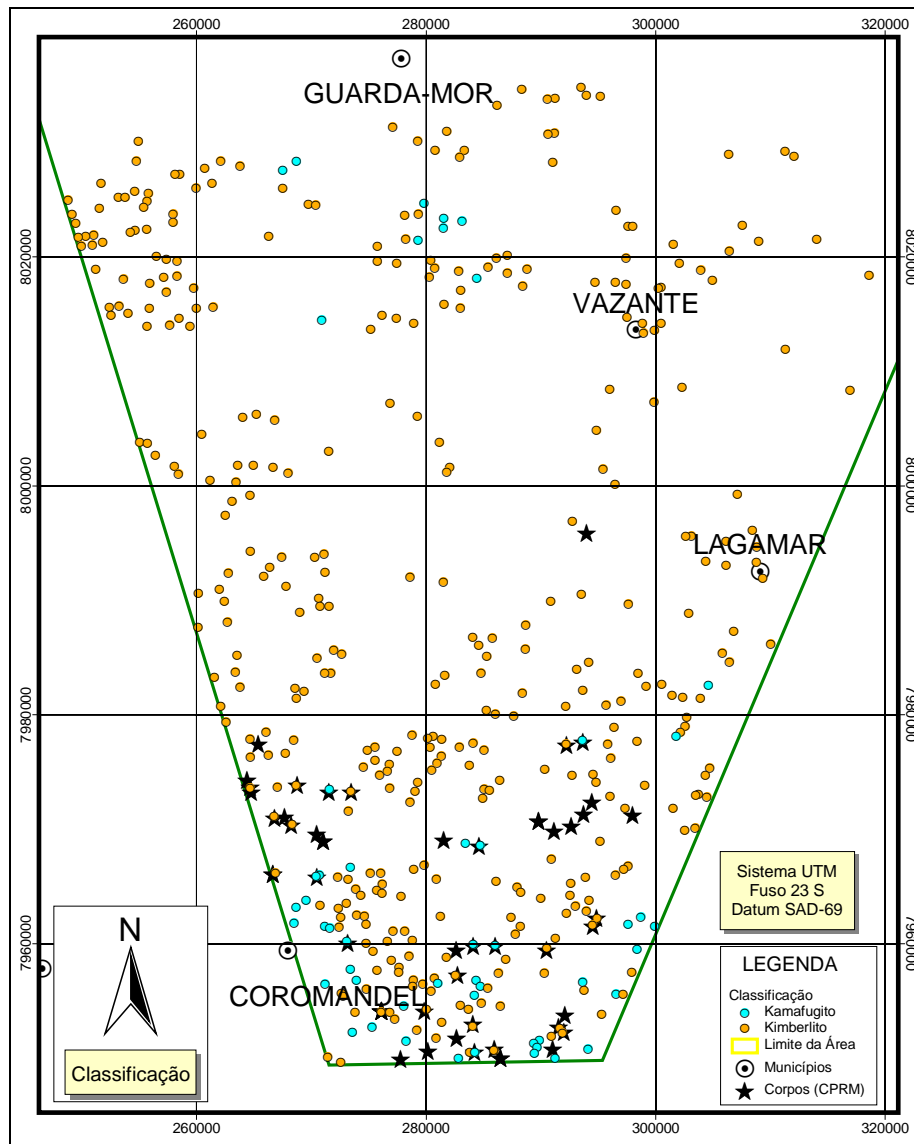


Figura 5.8: Resultado da Análise Discriminante para anomalias magnéticas detectadas visualmente.

Interessante observar que o kimberlito Vargem-01 encontra-se em uma mina de exploração de diamante secundário, próximo do Rio Santo Inácio, que é muito conhecido pelos garimpos e pelas ocorrências diamantíferas em seu leito. No campo, existe uma pequena cava na qual é possível observar um pacote de aproximadamente

dois metros de material pefítico sobre o corpo intrusivo. Isso justifica a ausência de anomalia nas imagens gamaespectrométricas advindas deste corpo.

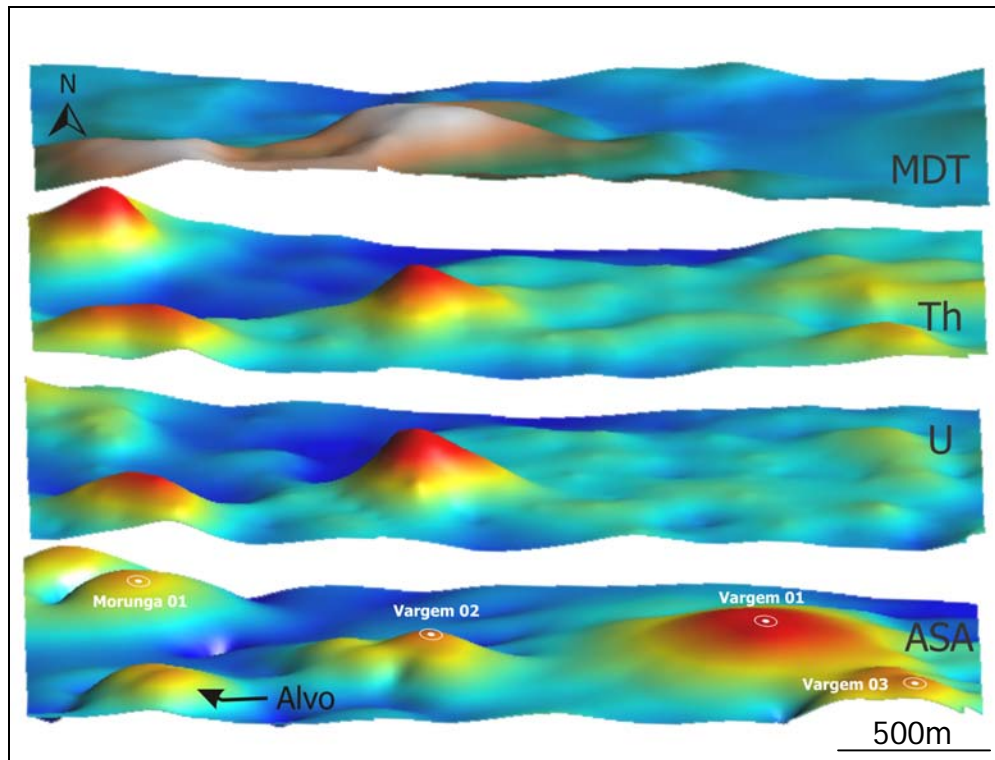


Figura 5.9: Alvo kamafugítico identificado a partir de anomalia selecionada pelo método visual.

O magnetismo dos corpos kimberlíticos também é um fator questionável, uma vez que a susceptibilidade magnética de kimberlitos mineralizados nem sempre é alta (Kontarovich & Tsyganov, 1999; Maré & Tabane, 2004) o que faz com que estes corpos nem sempre sejam identificados por magnetometria.

Adicionalmente, as rochas encaixantes podem exibir respostas magnéticas fortes, dificultando a percepção de anomalias geradas pelos kimberlitos. Na área de estudo, existe um corpo cuja anomalia magnética está pouco expressiva por causa de outras anomalias adjacentes, porém a anomalia gamaespectrométrica é notável (Figura 5.10). Tal situação possibilita a utilização da gamaespectrometria como instrumento complementar à magnetometria.

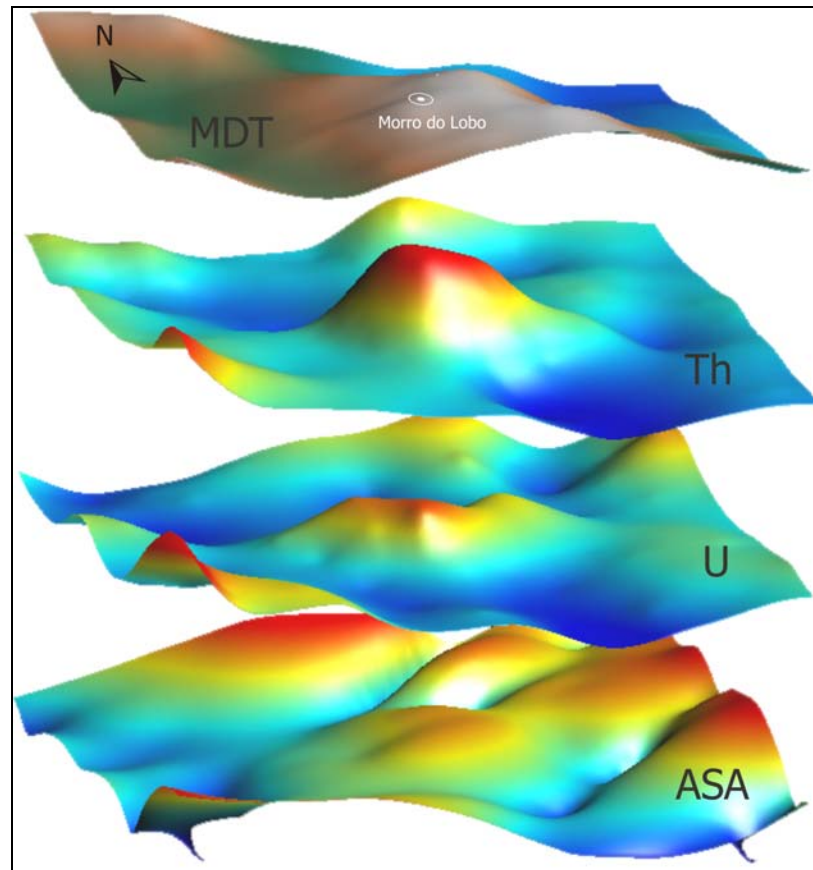


Figura 5.10: Anomalia magnética de corpo kimberlítico obliterada por anomalias adjacentes. Observar que as anomalias gamaespectrométricas são expressivas.

### 5.3.2.2 Seleção Automática de Anomalias Magnéticas

A seleção das anomalias pelo método automático conseguiu identificar 195 alvos com mais de 90% de semelhança com o modelo gerado para o cilindro vertical, que estão listados na Tabela 5.4. Os alvos são determinados pela presença de pontos (soluções) que se agrupam nos locais mais prováveis de se haver um padrão similar ao do modelo. Quanto maior o número de pontos no agrupamento, maior a confiabilidade do resultado.

Por motivos de tempo de processamento, apenas uma parte da imagem foi utilizada para a identificação das anomalias com o uso do algoritmo. Ainda assim, o número de anomalias encontradas por este método (195) está compatível com o número de anomalias detectadas visualmente e que se encontram dentro da mesma área (146).

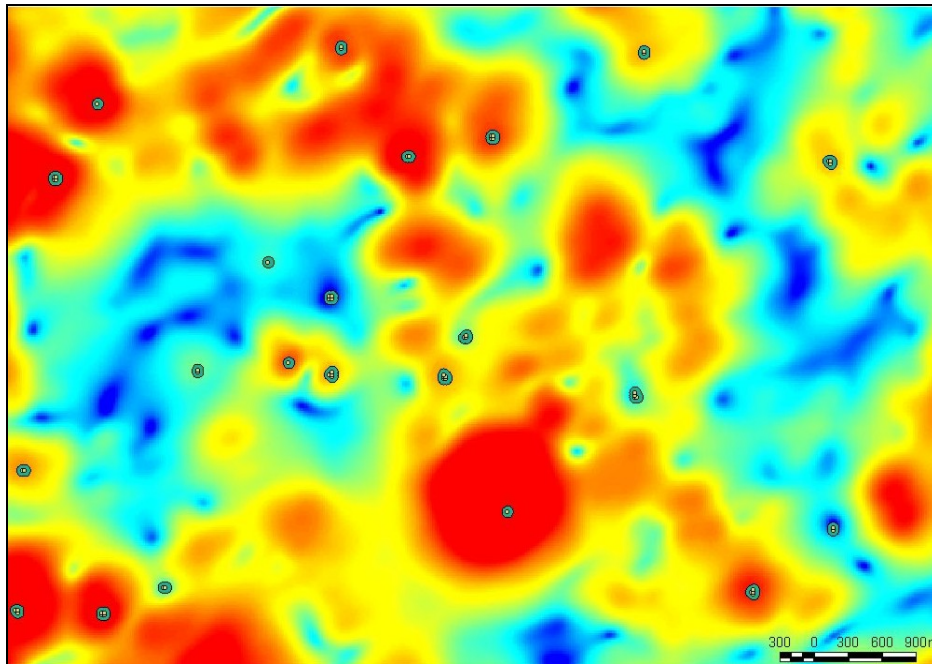


Figura 5.11: *Buffers* de 50m criados a partir das soluções do método automático e plotados sobre a imagem da ASA em uma parte da área de estudo.

Cada ponto dos agrupamentos gerados pelo método automático foi convertido em um polígono circular (*buffer*) com um raio de 50m, de forma que todos os pontos do mesmo agrupamento formassem um único polígono, após o processo de dissolução dos limites dos polígonos (Figura 5.11). Posteriormente os polígonos tiveram seus centróides calculados de modo que os pontos que os representam serviram para a amostragem dos planos de informação (Figura 5.12).



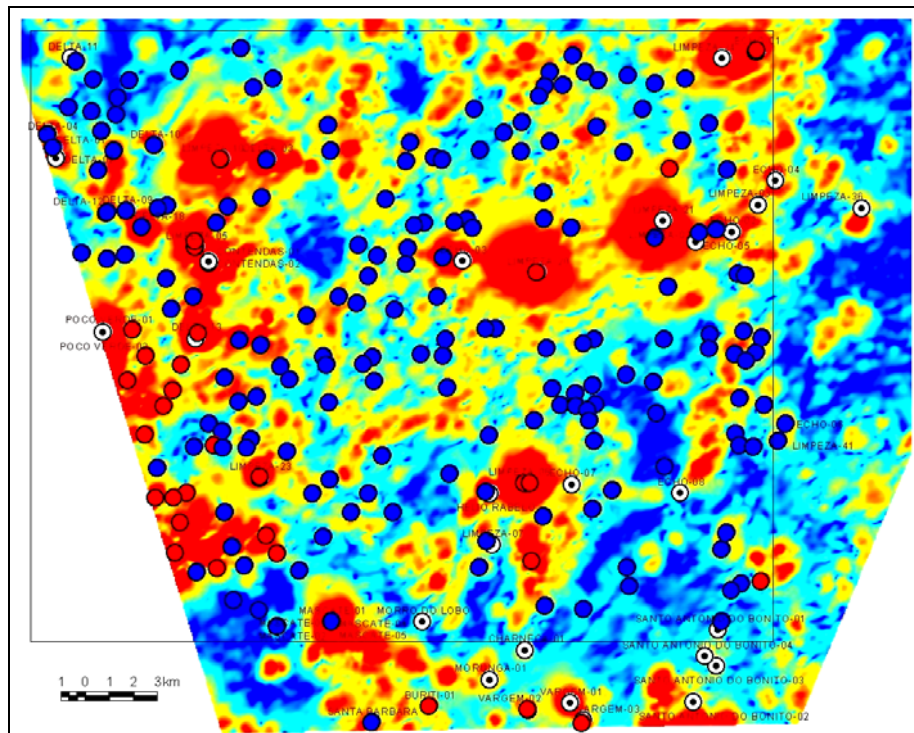


Figura 5.12: Localização e classificação dos centróides dos agrupamentos detectados para as anomalias magnéticas, a partir de um algoritmo (Geosoft, 2003).

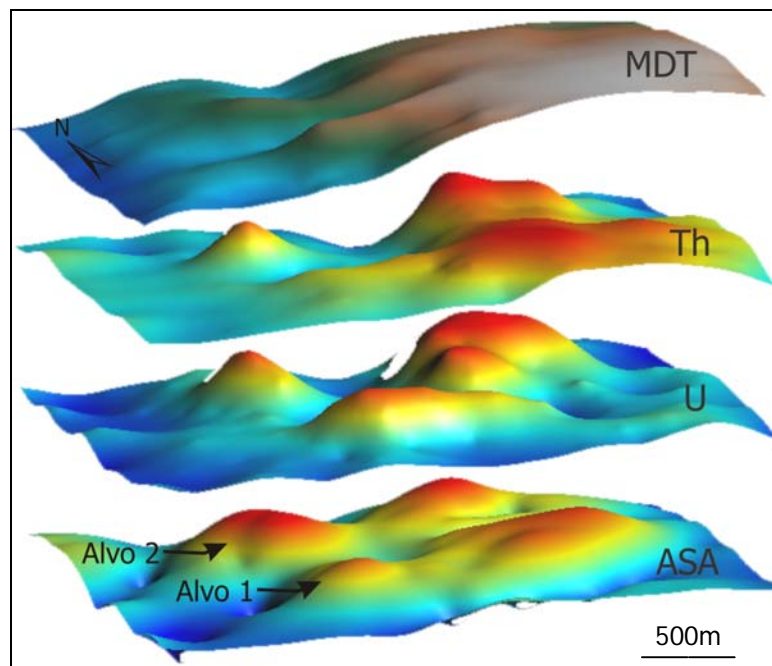


Figura 5.13: Identificação coincidente de alvo kamafugítico pelos métodos automático e visual (Alvo 1). O Alvo 2 foi classificado como kamafugítico pelo método visual.

Os alvos com escores mais altos coincidiram, por vezes, com a localização de corpos conhecidos, assim como no resultado da classificação das anomalias obtidas visualmente (Figura 5.14).



Tabela 5.3: Escores mais altos para classificação por Análise Discriminante dos corpos e anomalias detectadas automaticamente. Anomalias em destaque estão próximas a corpos conhecidos (CPRM, 2004), mas que não necessariamente foram utilizados como referência para classificação.

LABEL	GRUPO	ESCORE	K	Th	U	Th/K	U/K	U/Th	ASA
157	Kamaf	29.52	-1.07	5.09	6.47	2.57	2.87	-0.95	5.86
Limpeza-06	Kamaf	24.28	-1.34	4.58	5.31	3.16	3.38	-1.05	5.60
170	Kamaf	20.08	-1.28	3.97	6.26	2.63	3.55	-0.53	3.12
Limpeza-05	Kamaf	18.67	-0.97	2.56	4.58	1.26	1.94	-0.28	5.04
Limpeza-10	Kamaf	17.44	-0.68	4.04	4.12	1.39	1.25	-1.18	4.84
Vargem-02	Kamaf	14.87	-0.91	1.25	5.91	0.65	2.25	1.46	2.39
90	Kamaf	13.80	-0.91	2.27	3.19	1.06	1.36	-0.61	5.14
Limpeza-20	Kamaf	12.85	-1.27	4.01	3.23	2.64	2.25	-1.42	4.36
65	Kamaf	11.71	-0.86	2.15	2.52	0.93	1.05	-0.80	5.28
172	Kamaf	10.09	-1.35	3.69	3.62	2.70	2.67	-1.18	3.00
179	Kamaf	9.83	-0.68	2.53	3.69	0.87	1.14	-0.58	3.10
<b>155</b>	<b>Kamaf</b>	<b>9.80</b>	<b>-0.03</b>	<b>2.83</b>	<b>2.87</b>	<b>0.42</b>	<b>0.27</b>	<b>-1.04</b>	<b>4.03</b>
Mascate	Kimber	9.57	-0.35	-0.69	-0.28	-0.38	-0.21	0.60	4.60
Delta-18	Kimber	8.63	0.24	-0.60	-0.31	-0.51	-0.48	0.42	4.36
Vargem-03	Kamaf	8.57	-1.34	1.99	3.91	1.72	2.77	-0.14	2.51
Limpeza-23	Kamaf	8.49	-0.06	2.70	2.54	0.41	0.23	-1.09	4.02
64	Kimber	8.45	-0.95	0.45	0.57	0.36	0.56	-0.40	4.88
144	Kamaf	7.62	-1.36	1.94	4.19	1.74	2.97	0.01	1.85
Delta-01	Kimber	7.32	0.50	-1.15	-1.09	-0.68	-0.70	0.85	3.72
140	Kamaf	7.20	-0.52	0.62	3.09	0.10	0.77	0.83	3.36
183	Kamaf	7.19	-0.74	0.81	3.22	0.32	1.09	0.67	3.16
163	Kamaf	6.60	-0.77	1.92	2.94	0.74	1.04	-0.48	3.06
<b>41</b>	<b>Kimber</b>	<b>6.50</b>	<b>-1.41</b>	<b>1.44</b>	<b>0.83</b>	<b>1.58</b>	<b>1.57</b>	<b>-1.06</b>	<b>4.92</b>
178	Kamaf	6.03	-1.05	1.70	3.45	1.02	1.74	-0.10	2.28
Delta-04	Kimber	5.62	-0.25	-0.60	-1.00	-0.39	-0.43	-0.16	3.55
<b>2</b>	<b>Kamaf</b>	<b>5.47</b>	<b>-1.34</b>	<b>2.00</b>	<b>1.85</b>	<b>1.74</b>	<b>1.86</b>	<b>-0.97</b>	<b>3.99</b>
131	Kamaf	5.43	-0.73	2.19	2.75	0.80	0.94	-0.73	2.82
<b>34</b>	<b>Kimber</b>	<b>5.21</b>	<b>-0.09</b>	<b>-1.23</b>	<b>-1.30</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.56</b>	<b>0.82</b>	<b>3.03</b>
Echo-01	Kamaf	5.17	-1.23	1.91	1.80	1.42	1.52	-0.94	3.96
122	Kamaf	4.99	-0.61	3.14	2.67	1.00	0.77	-1.25	2.54
96	Kimber	4.54	0.64	0.52	0.60	-0.36	-0.46	-0.45	3.65
<b>53</b>	<b>Kimber</b>	<b>4.33</b>	<b>0.01</b>	<b>-1.05</b>	<b>-0.95</b>	<b>-0.57</b>	<b>-0.52</b>	<b>0.76</b>	<b>2.79</b>
71	Kimber	4.20	-0.22	1.06	0.24	0.06	-0.16	-1.09	4.02
Delta-09	Kimber	4.13	-0.97	-0.83	-0.06	-0.16	0.38	1.09	2.68
62	Kimber	3.96	1.25	-0.31	-0.41	-0.61	-0.75	-0.12	3.08
Buriti-01	Kamaf	3.76	-1.34	1.85	3.01	1.64	2.36	-0.40	2.00
<b>159</b>	<b>Kimber</b>	<b>3.57</b>	<b>0.62</b>	<b>0.17</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.43</b>	<b>-0.69</b>	<b>-0.97</b>	<b>3.42</b>
72	Kimber	2.36	-0.65	-1.59	-2.06	-0.58	-0.50	0.97	2.01
186	Kamaf	2.34	-0.58	0.61	2.73	0.13	0.74	0.65	2.14
27	Kimber	2.15	2.22	-0.61	-0.15	-0.75	-0.87	0.56	2.22
175	Kimber	2.03	-1.19	1.17	1.15	0.98	1.17	-0.73	3.19
116	Kamaf	1.84	-1.72	3.39	2.97	4.39	4.34	-1.26	1.04
126	Kimber	1.70	-0.09	0.22	0.10	-0.22	-0.27	-0.44	2.62
98	Kimber	1.51	-0.83	1.49	1.06	0.65	0.57	-0.99	3.28
158	Kimber	1.36	1.26	-0.85	-0.24	-0.70	-0.73	0.97	1.81
125	Kimber	1.34	0.46	0.04	0.17	-0.42	-0.47	-0.18	2.35
37	Kimber	1.28	-1.17	0.77	1.08	0.76	1.10	-0.42	2.67
StaBarbara	Kimber	1.20	0.66	0.34	0.38	-0.40	-0.50	-0.40	2.49
103	Kimber	0.94	-0.92	1.23	0.53	0.64	0.51	-1.06	3.02
<b>4</b>	<b>Kimber</b>	<b>0.57</b>	<b>-0.02</b>	<b>-0.86</b>	<b>-0.86</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.49</b>	<b>0.41</b>	<b>1.69</b>
191	Kimber	0.55	-0.11	-0.90	-2.47	-0.51	-0.80	-1.04	2.03
177	Kamaf	0.47	-1.11	2.29	2.17	1.38	1.41	-1.01	1.81
171	Kimber	0.39	1.56	0.02	0.71	-0.60	-0.67	0.20	1.91
36	Kimber	0.39	0.74	-0.26	0.87	-0.53	-0.45	0.74	1.66
Echo-06	Kimber	0.38	-0.07	0.06	0.74	-0.27	-0.14	0.16	1.93
3	Kimber	0.25	0.13	1.07	1.24	-0.09	-0.15	-0.60	2.51
7	Kimber	0.24	0.31	0.39	0.89	-0.30	-0.29	-0.15	2.09
114	Kimber	0.07	1.39	0.36	1.14	-0.52	-0.58	0.04	1.95
108	Kimber	0.06	-0.45	-0.76	-0.19	-0.37	-0.13	0.82	1.44
33	Kimber	-0.01	0.31	-0.06	-0.35	-0.40	-0.51	-0.42	1.97

Na porção sudeste da área, a coincidência de anomalias magnéticas detectadas pelos dois métodos, indica também um conjunto de anomalias gamaespectrométricas. A figura 5.13 apresenta as anomalias indicadas pelas classificações.

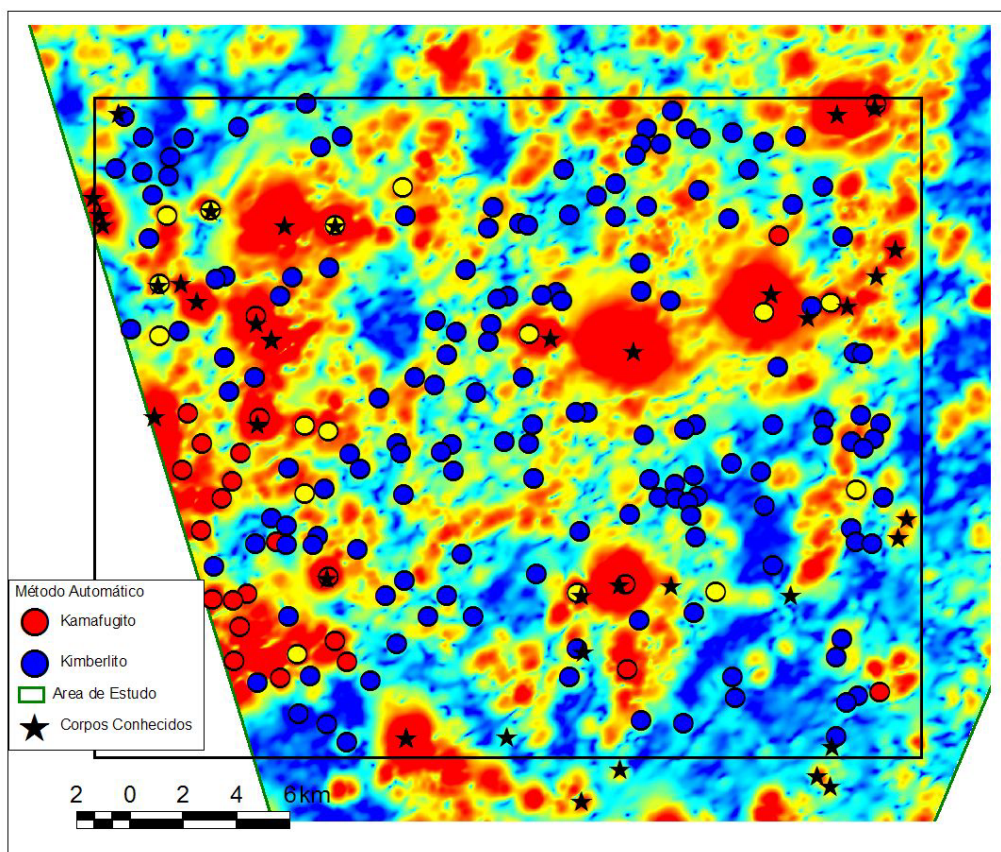


Figura 5.14: Resultado da classificação de anomalias identificadas pelo método automático, com indicação dos corpos kimberlíticos conhecidos. Em amarelo, as 16 anomalias com maiores escores.

### 5.3.2.3 Análise dos Resultados

Ao fim da aplicação desta metodologia, a restrição dos alvos a serem investigados pode ser feita tomando-se como base os escores mais elevados de cada método (visual e automático), a união dos dois por análise de proximidade de suas anomalias, ou ainda, a conjugação de escores e proximidade.

A união dos dois métodos por análise de proximidade prioriza as anomalias coincidentes que foram por eles identificadas, sem considerar os escores de cada um deles. Na figura 5.15, podem ser observadas as anomalias magnéticas identificadas tanto pelo método visual quanto pelo automático, sendo que se admitiu uma distância máxima de 100m entre as anomalias.

Considerando essa distância como limite de coincidência, 15 das 341 anomalias dentro da área reduzida (método automático) são comuns aos dois métodos, o que as torna alvos prioritários, representando 4,5% das anomalias. Excluindo-se as anomalias

que foram classificadas como kamafugitos, esse número cai para apenas 10, o que representa uma redução para apenas 2,9% do total de anomalias presentes na área.

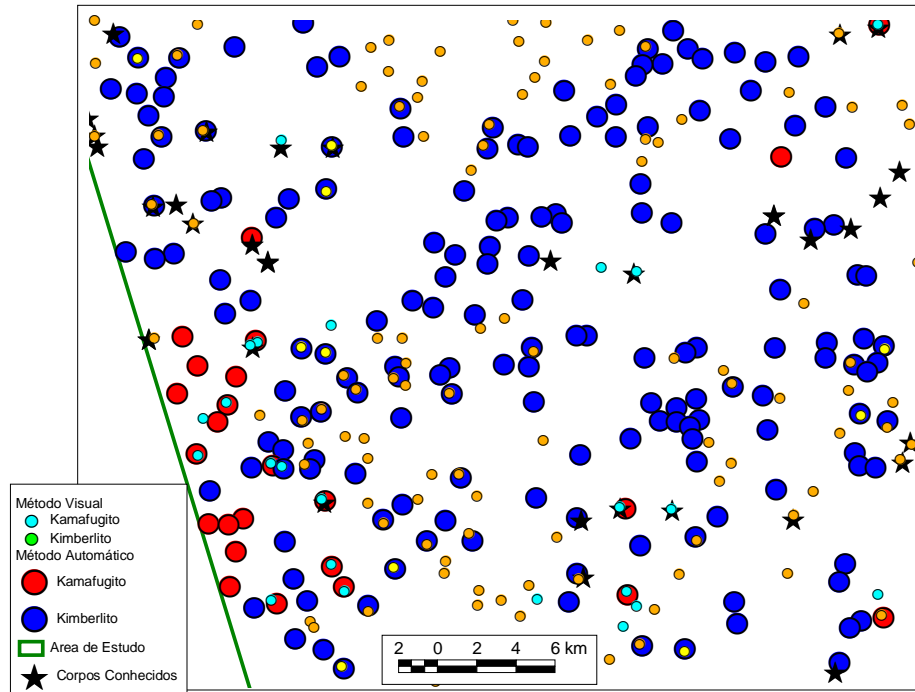


Figura 5.15: Corpos kimberlíticos conhecidos e resultado dos métodos visual e automático para identificação de anomalias. Pontos amarelos indicam anomalias coincidentes (<100m).

Dentre as duas formas de restrição de alvos, a mais interessante é a que leva em consideração os maiores escores, pois é um parâmetro quantitativo da semelhança das características geofísicas dos corpos conhecidos.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Os métodos de seleção de anomalias magnéticas apresentaram aproximadamente a mesma eficiência no que se refere ao número de anomalias detectadas.

Porém, é perceptível que são poucas as anomalias coincidentes identificadas pelos dois métodos na mesma área de investigação.

As limitações que atingem o método automático se referem principalmente à forma do corpo e conseqüentemente na anomalia por ele gerada. Para amenizar o problema, podem ser feitas várias aplicações do algoritmo com parâmetros distintos

para aumentar a definição dos alvos. Ainda assim, o algoritmo se limita a encontrar anomalias geradas por um único modelo geométrico: o cilindro vertical.

Em contrapartida, o método visual depende de um grau elevado de subjetividade para a identificação das anomalias, que neste caso está diretamente relacionado ao grau de conhecimento e da experiência do analista. O uso de produtos magnetométricos diversos, tais como redução ao pólo, derivada vertical e gradiente horizontal podem auxiliar na identificação de anomalias, reduzindo a subjetividade da análise.

Em relação ao tempo gasto nos dois métodos, a variação dos parâmetros utilizados no algoritmo da Geosoft (2003) e o conseqüente processamento podem ser muito dispendiosos. Assim, o tempo gasto nos dois métodos pode, em alguns casos, ser bem próximo. No caso deste trabalho, o tamanho de pixel é muito reduzido em relação à área total, o que levou à redução da área de investigação (Figura 5.7).

A grande vantagem do uso de Análise Discriminante é o fato de qualquer nova amostra que possua os valores das variáveis ( $eTh$ ,  $eU$  e  $ASA$ ) pode ser adicionada ao conjunto para ser classificada, uma vez que a função para os dois grupos já está definida. A desvantagem do seu uso é a necessidade de se conhecer alguns elementos que pertençam a cada grupo.

Entretanto, a classificação dos corpos gamaespectrometricamente anômalos por uso de classificação não-supervisionada (Médias-K) pode ser usada para gerar os grupos iniciais requeridos pela Análise Discriminante.

Estudos de favorabilidade, tais como Lógica *Fuzzy*, Pesos de Evidência e Redes Neurais também podem contribuir para melhor caracterização dos alvos (Paganelli *et al.*, 2002).

## **Capítulo 6: Conclusões e Sugestões**

---

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os dados analisados contribuem com o conhecimento técnico-científico no que se refere à prospecção de corpos kimberlíticos e de rochas ultramáficas alcalinas associadas.

A conjugação de dados geofísicos de natureza e propósitos distintos se mostrou eficiente para alcançar o objetivo do trabalho proposto. A partir do método gamaespectrométrico, que avalia variações superficiais (~0,5m), juntamente com a magnetometria foi possível estabelecer parâmetros geofísicos para a distinção entre os dois tipos de intrusões presentes na área de estudo.

O objetivo do trabalho está compatível com a configuração do aerolevante utilizado neste estudo. O espaçamento das linhas de vôo permite visualização de anomalias maiores que 500m, podendo identificar perturbações menores.

Além destes dois tipos de métodos, dados adicionais podem ser utilizados para melhorar os resultados da distinção dos corpos intrusivos.

Os canais de urânio (U), tório (Th) juntamente com os dados da amplitude do sinal analítico (ASA) foram os principais responsáveis pela distinção entre os corpos kimberlíticos e mafuríticos da região estudada.

A influência da topografia na definição das assinaturas radiométricas é um fator importante e deve ser observada. O uso de modelos digitais de terreno (MDT) e produtos derivados pode auxiliar nesta análise.

O método gamaespectrométrico se mostrou eficiente na detecção de anomalias radiométricas provenientes de corpos kimberlíticos e kamafugíticos da Província Alcalina do Alto Paranaíba – especialmente na região de Coromandel-MG, onde diversos corpos são aflorantes –, e permite a diferenciação entre estes dois grupos.

O procedimento desenvolvido nesta dissertação pode ser aplicado em outras regiões, desde que sejam respeitadas as limitações dos métodos, dos dados e dos condicionantes do meio físico da área em estudo.

O número reduzido de corpos de referência pode ter causado tendências ou imprecisões na caracterização das assinaturas geofísicas. Isso pode ser observado nos valores geofísicos abaixo da média da área e conseqüentemente no grande número de resultados obtidos para os kimberlitos.

Dois métodos de identificação foram empregados: um visual e um automático. A utilização concomitante dos dois métodos aperfeiçoa a identificação de anomalias geradas por corpos kimberlíticos, podendo também melhorar as atividades de investigação de áreas favoráveis a mineralizações primárias de diamante.

Foi possível verificar que o procedimento otimiza a prospecção de kimberlitos na PAAP, pois reduz os alvos identificados apenas por magnetometria, prioriza os alvos aflorantes e permite a identificação de kamafugitos.

Estudos mais detalhados de petrologia são necessários, assim como a melhoria da assinatura geoquímica dos corpos, para uma definição precisa dos fatores que determinam a relação das rochas estudadas com os dados aerogeofísicos.

No processamento dos dados, os parâmetros de modelagem do algoritmo utilizado, assim como a configuração da classificação podem ser ajustados para refinar os resultados.

A complementação do conjunto de dados com o uso de outros métodos geofísicos – gravimetria, eletromagnetometria – oferecerá melhores meios e menor ambigüidade na análise dos resultados. Adicionalmente, técnicas de favorabilidade mineral – Lógica Fuzzy, Redes Neurais, Pesos de Evidências – podem sugerir áreas onde há a maior probabilidade de ocorrência de kimberlitos.

A Análise Discriminante permite a classificação e ordenamento dos alvos prioritários para exploração de fontes primárias de diamantes, quando utilizados os dados de gamaespectrometria e magnetometria.

## **Bibliografia**

---



## 7. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA-ABREU, P.A., RENGGER, F.E. 2002. Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do Mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(1):1-14.
- ARAÚJO, A.L.N. 2000. *Petrologia dos pipes kimberlíticos e kamafugíticos da Província Alcalina do Alto Paranaíba, Minas Gerais e Goiás*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 243 p.
- ARAÚJO FILHO, J.O. 1980. Geology of the Pireneus Mega-Inflection Goiás, Brazil. 7<sup>o</sup> Geowiss. Lateinamer. Koll., Heidelberg. (submetido)
- ARAÚJO FILHO, J.O. 2000. The Pirineus Syntaxis: an example of two Brasiliano fold-thrust belts in Central Brazil and its implication for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Brasil, v. 30, n. 2, p. 144-148
- BARBOSA, O. 1955. Guia de Excursões. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Araxá. Noticiário da Sociedade Brasileira de Geologia.
- BARBOSA, O. 1965. Formação Areado. XIX Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro.
- BARBOSA, O., BATISTA, M.B., BRAUN, O.T.G., DYER, R.C., COSTA, J.C. 1969. Geologia e Inventário dos Recursos Minerais do Projeto Brasília. PROSPEC. DNPM. Rio de Janeiro. 225p.
- BARBOSA, O., BRAUN, O.P.G., DYER, R.C., CUNHA, C.A.B.M. 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro. DNPM/DFPM. Boletim 136. 140p.
- BARBOSA, O., SVISERO, D.P., HASUI, Y. 1976. Kimberlites in Alto Paranaíba, Minas Gerais. XXIX Brazilian. Geol. Congr., p 232.
- BECEGATO, V.A., FERREIRA, F.J.F. 2005. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica* 23(4):371-405.
- BERROCAL, J., MARANGONI, Y., SÁ, N.C., FUCK, R.A., SOARES, J.E.P., DANTAS, E.L., PEROSI, F., FERNANDES, C. 2004. Deep seismic refraction and gravity crustal model and tectonic deformation in Tocantins Province, Central Brazil. *Tectonophysics*, **388**:187-199.
- BIZZI, L.A. 1993. *Mesozoic alkaline volcanism and mantle evolution of the southwestern São Francisco Craton, Brazil*. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Geológicas. Universidade da Cidade do Cabo.
- BIZZI, L.A., DE WIT, M.J., SMITH, C.B., Mc DONALD, I. 1995. Heterogeneous enriched mantle and Dupal type magmatism along SW margin of São Francisco Craton, Brazil. *Journal of Geodynamics*, **20**:469-491.
- BIZZI, L.A., SMITH, C.B., MEYER, H.O.A., ARMSTRONG, R., DE WIT, M.J. 1991. Mesozoic kimberlites and related rocks in southwestern São Francisco Craton, Brazil: a case for local mantle reservoirs and their interaction. V International Kimberlite Conference. Extended Abstracts, 17. Araxá.
- BLAKELY, R.J. Potential Theory in Solid-Earth Gravity and Magnetism Studies. 1993. USGS, EUA.
- BLUM, M. L. B. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Tese de Doutorado, UnB.
- BREINER, S. 1999. Applications manual for portable magnetometers. Geometrics. Califórnia.

- BROD, J.A., GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., JUNQUEIRA-BROD, T.C., SEER, H.J., MORAES, L.C., BOAVENTURA, G.R. 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP) southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3):408-412
- CAMPOS, J.E.G. 1992. A glaciação Permo-Carbonífera nas regiões de Canabrava e Santa Fé de Minas/MG. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 104p.
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997a. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências* 27(3):269-282
- CAMPOS, J.E.G., DARDENNE, M.A. 1997b. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências* 27(3):283-294
- CAMPOS, J.E.G., GONZAGA, G.M. 1999. O transporte de diamantes por sistemas fluviais a longas distâncias: uma visão crítica. *Revista Brasileira de Geociências* 29(2): 113-118
- CAMPOS NETO, M.C. 1984. Geometria e fases de dobramentos brasileiros superpostos no oeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*. 14(1):60-68.
- CARVALHO, J.B. 1997. Petrologia de xenólitos mantélicos da Província do Alto Paranaíba, Minas Gerais. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 395p.
- CASTRO, P.T.A. 1997. *Os conglomerados associados ao Grupo Bambuí na porção sudoeste do Cráton do São Francisco: sedimentologia, estratigrafia e implicações tectônicas*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 264p.
- COOPER, G.R.J., COWAN, D.R. 2005. The use of textural analysis to locate features in geophysical data. *Computers & Geosciences* 31:882–890
- CORDANI, R. 2005. Um critério para escolha da direção de linhas de vôo em aeromagnetometria no Brasil. Anais do IX Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. Salvador. SBGf.
- COSTA, A.J.M. 1989. Palmietfontein kimberlite pipe, South Africa – A case history. *Geophysics*, 54(6):689-700.
- COSTA, L.A.M., ANGEIRAS, A.G., VALENÇA, J.G., STEVENAZZI, V. 1970. Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em tectonogrupos. Rio de Janeiro, Bol. Geol. Inst. Geociências, 5:3-34.
- COSTA, L.A.M., ANGEIRAS, A.G. 1971. Geosynclinal evolution in the Epi-Baikalian platform of the Central Brazil. *Geol. Rund.*, 60(2):1024-1050
- COSTA, M.T. da, GROSSI-SAD, J.H. 1968. O Cretáceo em Minas Gerais. XXII Congresso Brasileiro de Geologia. SBG. Belo Horizonte. *Resumo das Comunicações*.
- CPRM. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha SE-23. CPRM. Brasília. CD-ROM
- DARDENNE, M.A. 1978. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. SBG, v1, p.299-308
- DARDENNE, M.A. 1979. *Les minéralisations de plomb, zinc, fluor du Protérozoïque Supérieur du Brésil Central*. Tese de Doutorado. Université Paris Vi. 251p.
- DARDENNE, M.A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. Anais do Simpósio do Cráton São Francisco e suas faixas marginais. SBG. Salvador. 140-147
- DARDENNE, M.A. 2000. The Brasilia Fold Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Org.). *Tectonic Evolution of South America*. 1 ed. Rio de Janeiro, 2000, v. único, p. 231-263

- DARDENNE, M.A., SCHOBENHAUS, C. 2001. Metalogênese do Brasil. Ed. Universidade de Brasília. 392p.
- FLEISCHER, R. 1998. A rift model for the sedimentary diamond deposits of Brazil. *Mineralium Deposita* **33**: 238 – 254.
- FONSECA, M.A. 1996. *Estilos estruturais e arcabouço tectônico do segmento setentrional da Faixa Brasília*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 165p.
- FONSECA, M.A., DARDENNE, M.A. 1996. Arcabouço estrutural e evolução cinemática da Faixa Brasília em seu segmento setentrional. Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. Resumos Expandidos, v6. p.98-100
- FOWLER, J.A., GRÜTTER, H.S., KONG, J.M., WOOD, B.D. 2001. Diamond exploration in northern Ontario with reference to the Victor Kimberlite, near Attawapiskat. *Explor. Mining Geol.*, Vol. 10, Nos. 1 and 2, pp. 67–75.
- FREITAS-SILVA, F.H. 1996. *Metalogênese do depósito do Morro do Ouro, Paracatu - MG*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 339p.
- FREITAS-SILVA, F.H., DARDENNE, M.A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. Anais do IV Simpósio de geologia do Centro-Oeste. Brasília. Sociedade Brasileira de Geologia DF/C-O. p.161-163.
- FUCK, R.A. 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. Anais do IV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. SBG DF/C-O, p.181-183.
- GEO SOFT. 1996. MAGMAP 2-D. Frequency domain processing. Canadá, GEO SOFT Inc.
- GEO SOFT. 2003. Kimberlite (mkModel.gx). Arquivo de ajuda. Canadá. Geosoft Inc.
- GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., LEONARDOS, O.H., DICKIN A.P., MITCHELL J.G. 1995. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume - evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, **36**:189-229.
- GONZAGA, G. M. e TOMPKINS, L. A., 1991, Geologia do Diamante, in: Schobbenhaus, C., Queiroz, E. T., e Coelho, C. E. S., Eds., Principais depósitos minerais do Brasil: DNPM/CPRM, **IV**, 53-116.
- GUIMARÃES, E.M. 1997. *Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra-Cabeceiras (GO)*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 269p.
- HAGGERTY, S.E. 1999. A diamond trilogy: superplume, supercontinent, supernovae. *Science*. 285:851-859.
- HARALYI, N.L.E., SVISERO, D.P. 1984. Metodologia geofísica integrada aplicada a prospecção de kimberlitos da região oeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências* **14**(1):12-22
- HARVEY, S.E., ZONNEVELD, J.-P., KJARSGAARD, B.A. 2003. Diamondiferous Kimberlites of Central Saskatchewan Project: Update. In: Summary of Investigations 2003, Volume 2, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Industry Resources, Misc. Rep. 2003-4.2, CD-ROM, Paper C-1, 5p.
- IAEA. 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. International Atomic Energy Agency. 179p.

- IBGE. 2005. Carta Internacional ao Milionésimo – Folha SE-23. Arquivo disponível em [http://www.ibge.gov.br/servidor\\_arquivos\\_geo/diretorios.php?caminho=/PUB/mapas/Carta\\_Internacional\\_ao\\_Milionesimo#](http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_geo/diretorios.php?caminho=/PUB/mapas/Carta_Internacional_ao_Milionesimo#). IBGE. Brasil.
- JAKUBEC, J. 2004. Role of geology in diamond project development. *Lithos* 76:337– 345
- JANSE, A.J.A. 1994. Is Clifford's Rule still valid? Affirmative examples from around the world. *In*: H.O.A. Meyer and O. Leonardos (Editors), *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference 2, Diamonds: Characterization, Genesis and Exploration*. ed. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, pp.215-235.
- JONES, A.G., CRAVEN, J.A. 2004. Area selection for diamond exploration using deep-probing electromagnetic surveying. *Lithos* 77:765– 782.
- KEATING, P. 1995. A simple technique to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes. *Exploration and Mining Geology*, 4(2):121-125.
- KEATING, P., SAILHAC, P. 2004. Use of the analytic signal to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes. *Geophysics*, 69(1):180–190,
- KONTAROVICH, R. S., TSYGANOV, V. A. 1999. Successes and failures of geophysical techniques for diamond exploration. Publicado em artigo da Internet: <http://www.aerogeophysica.com/eng/doclad/tsygan.html>
- LASA, 2001a, Projeto SEDEX chumbo-zinco nas regiões de Paracatu e João Pinheiro, Minas Gerais: Brasil, Rio de Janeiro, LASA – Engenharia e Prospecções S.A.: Brasil: Brasil, Rio de Janeiro, Relatório Final do levantamento. Processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, Volume I, Texto Técnico.
- LASA, 2001b, Projeto de depósitos de zinco em Vazante-Paracatu, Minas Gerais: Brasil, Rio de Janeiro, LASA – Engenharia e Prospecções S.A.: Brasil: Brasil, Rio de Janeiro, Relatório Final do levantamento. Processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos, Volume I, Texto Técnico.
- LEONARDOS, O.H., MEYER, H.O.A. 1991. Outline of the geology of western Minas Gerais. Field Guide Book, International Kimberlite Conference, 5. Araxá. CPRM, p. 17-24.
- LOCKHART, G., GRÜTTER, H., CARLSON, J. 2004. Temporal, geomagnetic and related attributes of kimberlite magmatism at Ekati, Northwest Territories, Canadá. *Lithos* 77:665– 682
- LUIZ, J. G., COSTA E SILVA, L. M., *Geofísica de Prospecção*. 1995. Ed. Universitária UFPA. Belém, PA. 311pp.
- MACNAE, J. 1995. Applications of geophysics for the detection and exploration of kimberlites and lamproites. *Journal of Geochemical Exploration* 53:213-243
- MADALOSSO, A. 1980. Considerações sobre a paleogeografia do Grupo Bambuí na região de Paracatu, MG. *Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia*, v2, p. 772-785. Camboriú.
- MADALOSSO, A., VALLE, C.R.O. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e sedimentologia do Grupo Bambuí na região de Paracatu – Morro Agudo (MG). *Anais do XXX Congresso de Geologia*, v 2, p 622-634.
- MARÉ, L.P., TABANE, L.R. 2004. *Physical Properties of South African Rocks*. Cidade do Cabo, Council for Geosciences, South African Geophysical Atlas. Volume 4, 29 p.
- MARINI, O.J., FUCK, R.A., DANNI, J.C.M., DARDENNE, M.A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e do seu embasamento. *Anais do Simpósio sobre o Cráton São Francisco e suas faixas marginais*. Salvador. p. 100-115

- MINTY, B. R. S., 1991, Simple micro-levelling for aeromagnetic data: *Expl. Geoph.*, **22**, 591-592.
- MITCHELL, R.H. 1995. The role of petrography and lithochemistry in exploration for diamondiferous rocks. *Journal of Geochemical Exploration*, **53**:339-350.
- PAGANELLI, F., RICHARDS, J.P., GRUNSKYE, C. 2002. Integration of Structural, Gravity, and Magnetic Data Using the Weights of Evidence Method as a Tool for Kimberlite Exploration in the Buffalo Head Hills, Northern Central Alberta, Canada. *Natural Resources Research*, **11**(3): 219-236
- PEREIRA, L.F. 1992. *Relações tectono-estratigráficas entre as unidades Canastra e Ibiá na região de Coromandel, MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 75 p.
- PEROSI, F., BERROCAL, J. 2003. Modelo estrutural dos setores Central e Sudeste da Província Tocantins utilizando dados de refração sísmica profunda. 8th Internat. Cong. of the Brazilian Geophy. Soc., Rio de Janeiro. Expanded Abstracts Volume (CD-ROM).
- PISANI, J.R.T. 2006. Exploração e pesquisa de kimberlitos e diamantes no Brasil. Palestra proferida no XLIII Congresso Brasileiro de Geologia. SBG. Aracaju.
- PIMENTEL, M.M., FUCK, R.A., BOTELHO, N.F. 1999. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil: a review, *Lithos*, **46** (3):1-21
- PIRES, A.C.B., SILVA, C.A., MORAES, R.A.V., FRANCO, H.A., SILVA, L.G. 2005. Classificação de corpos intrusivos na região de Coromandel (MG) com apoio de dados magnéticos e gamaespectrométricos: resultados preliminares. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante e II South American Symposium on Diamond Geology. Diamantina, MG. Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Minas Gerais, 2005. v. 1. p. 117-120.
- POWER, M., BELCOURT, G., ROCKEL, E. 2004. Geophysical methods for kimberlite exploration in northern Canadá. The Leading Edge. Novembro 2004.
- REYNOLDS, J.M. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. Inglaterra.
- ROMBOUTS, L. 2003. Assessing the diamond potential of kimberlites from discovery to evaluation bulk sampling. *Mineralium Deposita* 38:496–504
- SAHAMA, T.G. 1974. Potassium-rich alkaline rocks. *In*: Sorensen, H. The alkaline rocks. John Wiley & Sons, New York, 622 p.
- SCHOBENHAUS, C., CAMPOS, D.A., DERZE, G.R., ASMUS, H.E. 1984. Geologia do Brasil. DNPM. Brasília.
- SCHULZE, D.J. 2003. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds. *Lithos*, 71:195-213
- SEER, H.J. 1999. *Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Araxá, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 268 p.
- SEER, H.J., MORAES, L.C.D., FOGAÇA, A.C.C. 1989. Roteiro geológico para a região de Lagoa Formosa-Chumbo-Carmo do Paranaíba – MG. p. 58. Boletim SBG-MG, nº 9.
- SEER, H.J., BROD, J.A., FUCK, R.A., PIMENTEL, M.M., BOAVENTURA, G.R., DARDENNE, M.A. 2001. Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica neoproterozóica na Faixa de Dobramentos Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3):385-396
- SGARBI, G.N.C. 1991. Arenitos eólicos da Formação Areado (Bacia Cretácea do São Francisco): caracterização, diagênese e aspectos químicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 21:342-354

- SGARBI, P.B.A., GASPAR, J.C., VALENÇA, J.G., Brazilian Kamafugites. 2000. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3):417-420
- SGARBI, G.N.C., SGARBI, P.B.A., CAMPOS, J.E., DARDENNE, M.A., PENHA, U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozóico da Bacia do São Francisco. *In: Pinto, C.P., MARTINS-NETO, M.A. Bacia do São Francisco – Geologia e Recursos Naturais. SBG-MG. Belo Horizonte. 349p.*
- SIMANDL, G.J. 2004. Concepts for diamond exploration in “on/off craton” areas—British Columbia, Canadá. *Lithos* 77:749– 764
- SIMÕES, L.S.A. 1995. *Evolução tectonometamórfica da Nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 149 p.
- SIMÕES, L.S.A., NAVARRO, G. 1996. Estruturação da Faixa Brasília na região de Araxá-MG. *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador. SBG, v.6 p.92-95*
- SIMÕES, L.S.A., VALERIANO, C.M. 1990. Porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília: estágio atual do conhecimento e problemas de correlação tectono-estratigráfica. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Geologia. Natal. SBG. v6, p. 2564-2575*
- STRIEDER, A.J. 1993. *Deformação e metamorfismo na região de Santa Cruz de Goiás: correlação tectono-estratigráfica e evolução tectônica regional*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 258 p.
- SVISERO, D.P. 1979. Piropos cromíferos da mina de diamante de Romaria: composição química e origem. *Bol. Mineral.*, 6:7-14.
- SVISERO, D.P. 1995. Distribution and origin of diamonds in Brazil: an overview. *Journal of Geodynamics*. Vol. 20, No. 4, 493-514, pp.
- SVISERO, D.P., MEYER, O.A.H., TSAI, H.M. 1977. Kimberlite minerals from Vargem-(Minas Gerais) and Redondão (Piauí) diatremes and garnet-lherzolite xenoliths from Redondão. *Revista Brasileira de Geociências. 7:1-13.*
- SVISERO, D.P., HASUI, Y., DRUMOND, D. 1979. Geologia de kimberlitos do Alto Paranaíba, Minas Gerais. *Min. e Metal.*, 406:34-38.
- SVISERO, D.P., HARALYI, N.L.E., GIRALDI, V.A.V. 1980. Geologia dos kimberlitos de Limeira 1, Limeira 2 e Indaiá, município de Douradoquara (MG). 31 Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú. *Anais, cap 10, p5014-5026.*
- SVISERO, D.P., HARALYI, N.L.E., FEITOSA, V.M.N. 1982. Geologia e geofísica do kimberlito de Sucuri, Monte Carmelo, MG. 32 Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. *Anais, 2:464-465.*
- SVISERO, D.P., MEYER, O.A.H., HARALYI, N.L.E., HASUI, Y. 1984. A note on the geology of some Brazilian kimberlites. *Jour. Geol.* 92:331-338.
- SVISERO, D.P., ULBRICH, M.N.C., VLACH, S.R.F., BASEI, M.A.S., SHCULTS-GUTTLER, R.A. 2004. Composição, origem e idade de minerais resistatos das intrusões Vargem-1, 2 e 3, Coromandel, MG. *Anais do XLII Congresso Brasileiro de Geologia. Araxá.*
- TALLARICO, F.H.B. 1993. Petrologia das intrusões da Mata do Lenço, Córrego do Couro e Morro Alto – Província Magmática do Alto Paranaíba – Região de Abadia dos Dourados, MG. *Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 89 p.*
- TOMPKINS, L.A., GONZAGA, G.M. 1989. Diamonds in Brazil and proposed model for the origin and distribution of diamonds in the Coromandel region, Minas Gerais, Brasil. *Economic Geology*, 84:591-602.

VALERIANO, C.M. 1992. *Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da Represa de Furnas, sudoeste de Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 192p

VAN DECAR, J.C., JAMES, D.E., ASSUMPÇÃO, M. 1995. Seismic evidence of a fossil plume beneath South America and implications for plate driving forces. *Nature*, 378:25-31

WINTER, J.D. 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall. 699p

### **Páginas Eletrônicas**

Probabilidades e Estatística I - [http://myspace.eng.br/mat/stat/prob\\_est1.asp](http://myspace.eng.br/mat/stat/prob_est1.asp)

Instituto brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): <http://www.ibge.gov.br>

[http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/dynamo\\_effect.html](http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/dynamo_effect.html)

## **Anexo I: Produtos Gerados**

---



## **A1 ANEXO I: PRODUTOS GERADOS**

### **A1.1 – PRODUTOS DE MAGNETOMETRIA**

Os produtos gerados foram interpolados em malha de 50m, pelo método de curvatura mínima. Para adequação em relação dos alvos investigados e com o objetivo de suavizar a visualização, a célula das imagens foi reamostrada para 20m, pelo método de vizinho mais próximo.

Apenas as imagens da amplitude do sinal analítico (ASA) e do campo magnético anômalo (CMA) foram utilizadas neste trabalho, portanto apenas elas estão presentes neste anexo.

A escala original das imagens geradas foi de 1:750.000, porém estas foram redimensionadas para melhorar a visualização das mesmas em papel tamanho A4.

As informações cartográficas são:

- Datum SAD-69;
- Sistema de Coordenadas UTM;
- Fuso 23 Sul;
- Unidades em metros.

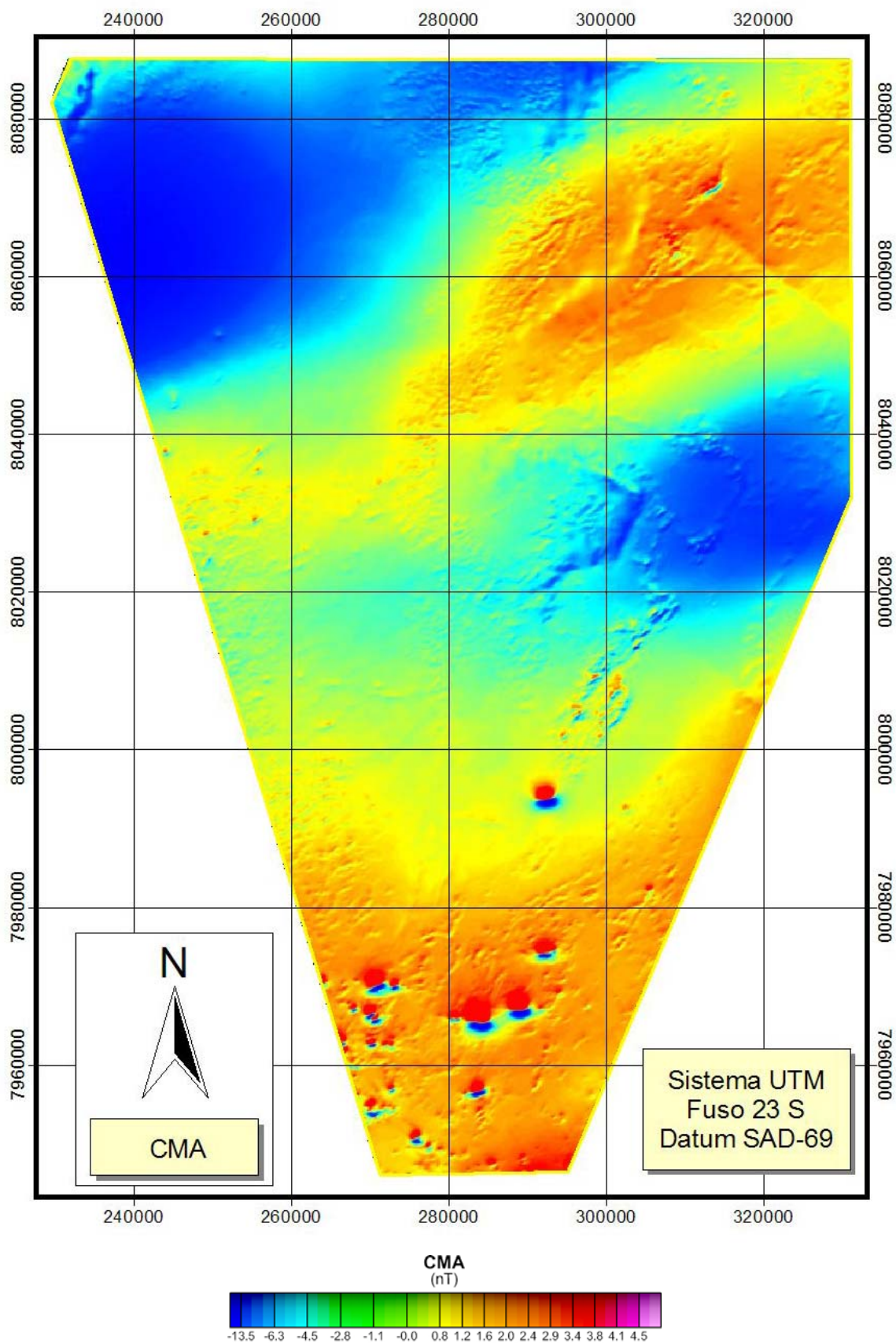


Figura A1.1: Imagem do Campo Magnético Anômalo (CMA).

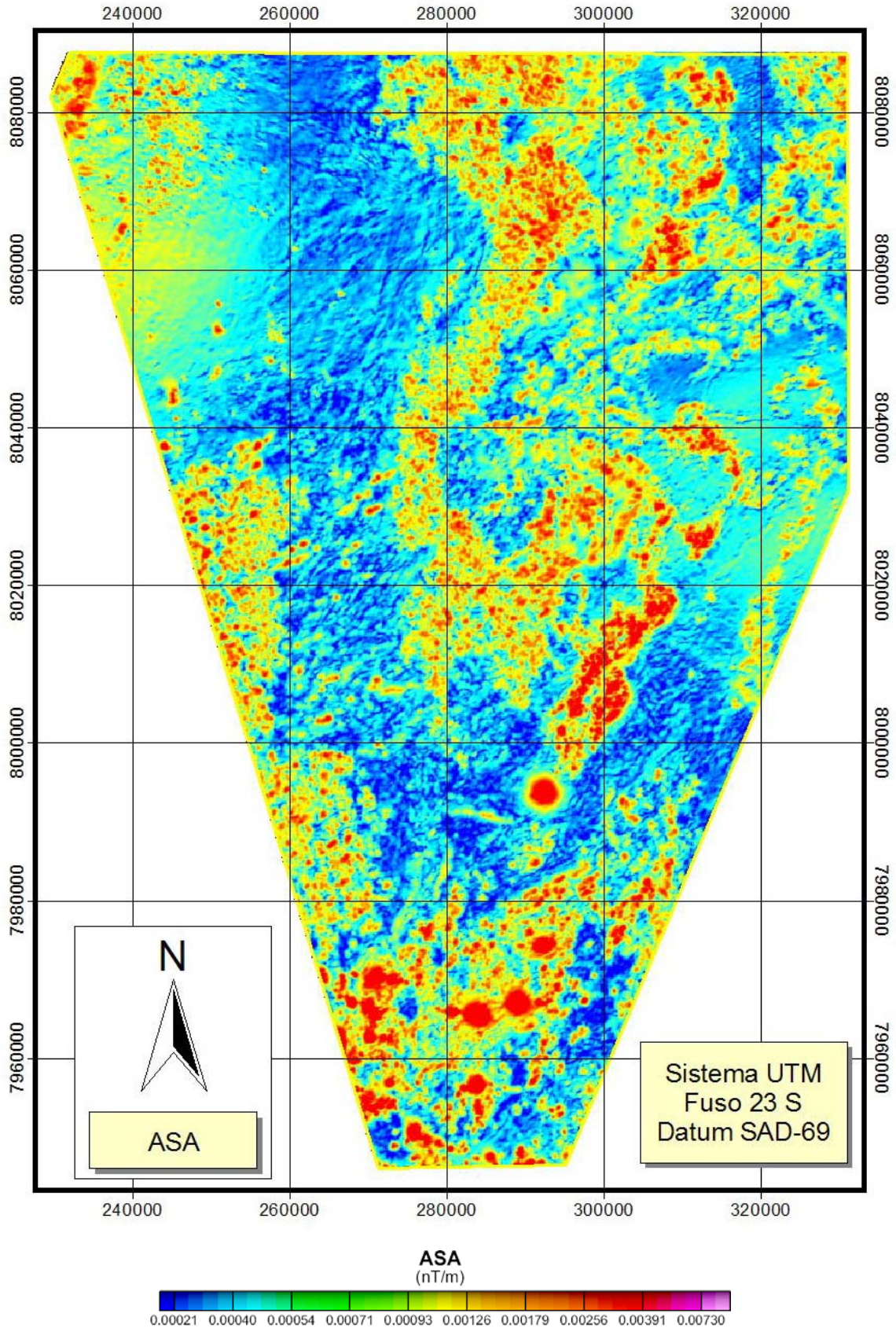


Figura A1.2: Imagem da Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

## **A1.2 – PRODUTOS DE GAMAESPECTROMETRIA**

Os produtos gerados foram interpolados em malha de 50m, pelo método de curvatura mínima. Para adequação em relação dos alvos investigados e com o objetivo de suavizar a visualização, a célula das imagens foi reamostrada para 20m, pelo método de vizinho mais próximo.

Foram gerados as imagens dos canais K, Th e U, além do MDT e das razões Th/K, U/K e U/Th.

As informações cartográficas das imagens são:

- Datum SAD-69;
- Sistema de Coordenadas UTM;
- Fuso 23 Sul;
- Unidades em metros.



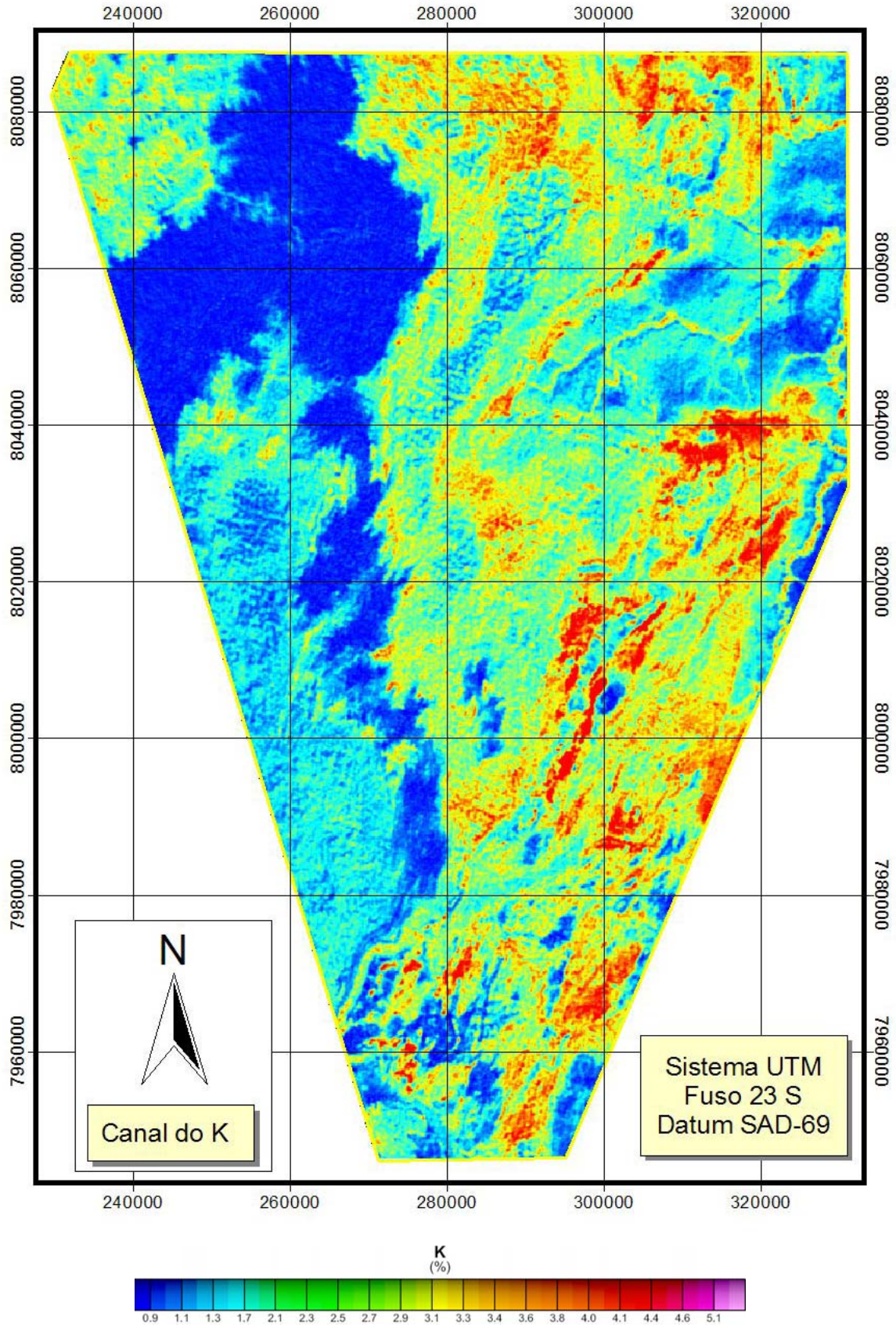


Figura A1.3 Imagem do Canal do Potássio (K).



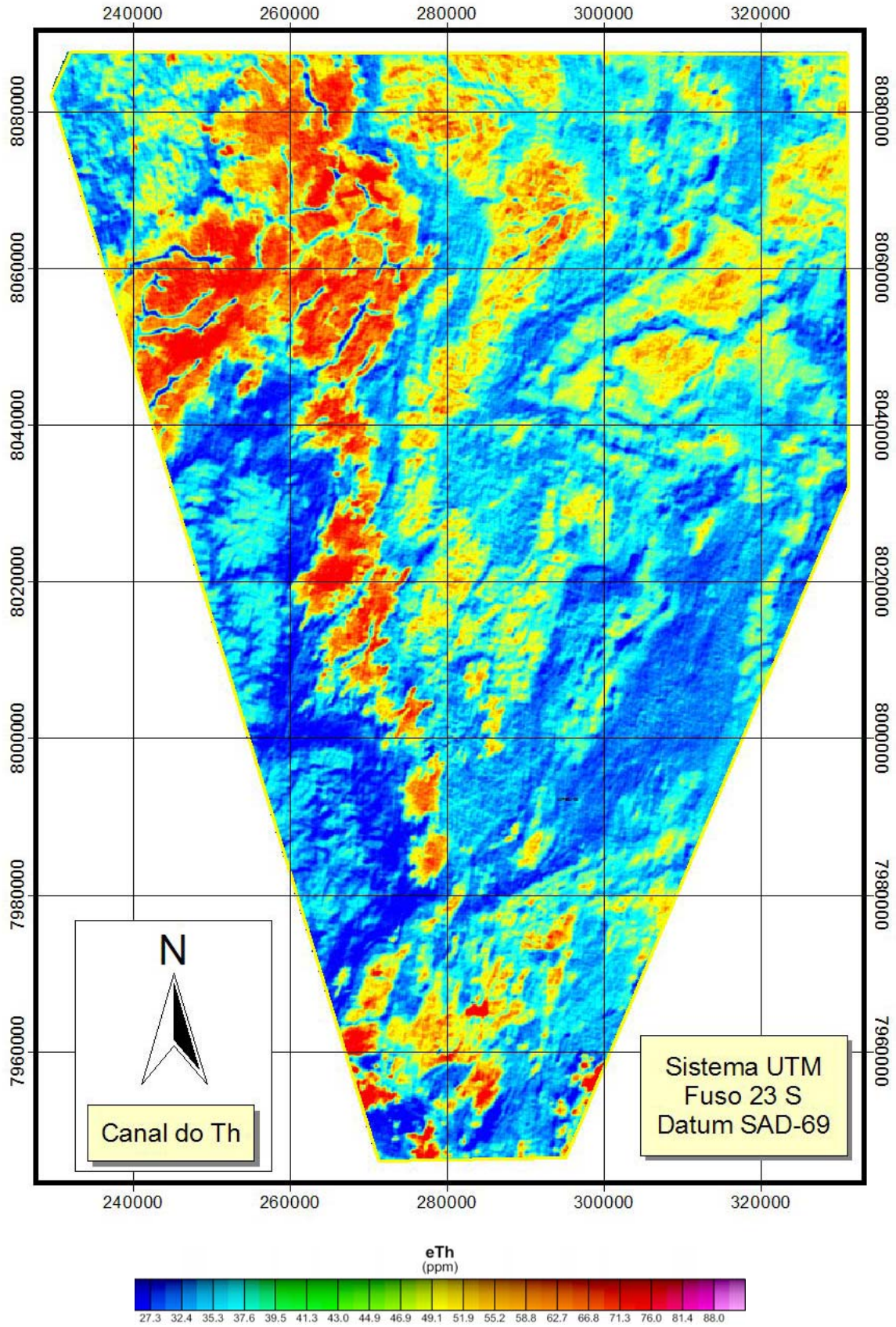


Figura A1.4: Imagem do Canal do Tório (Th).



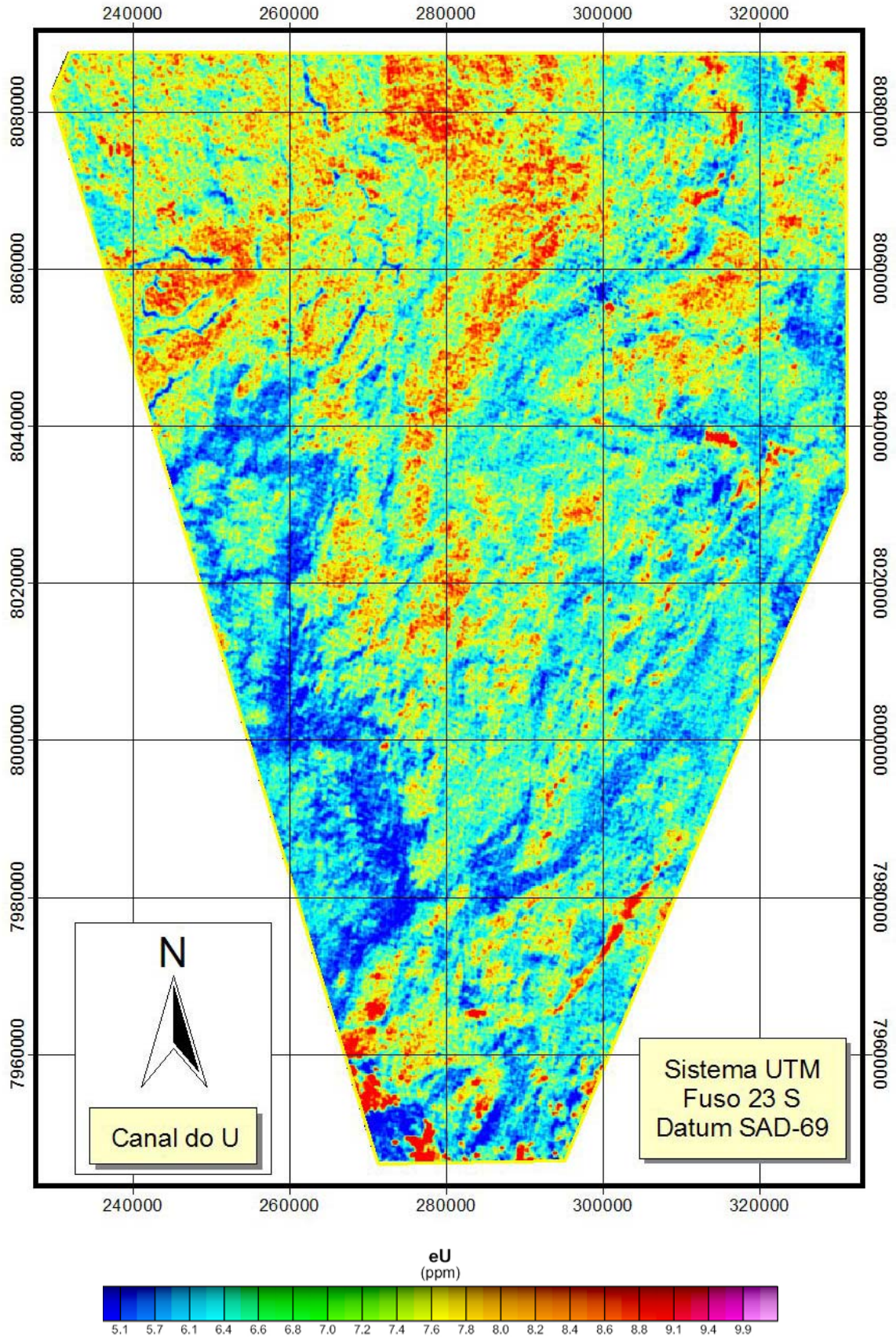


Figura A1.5: Imagem do Canal do Urânio (U).



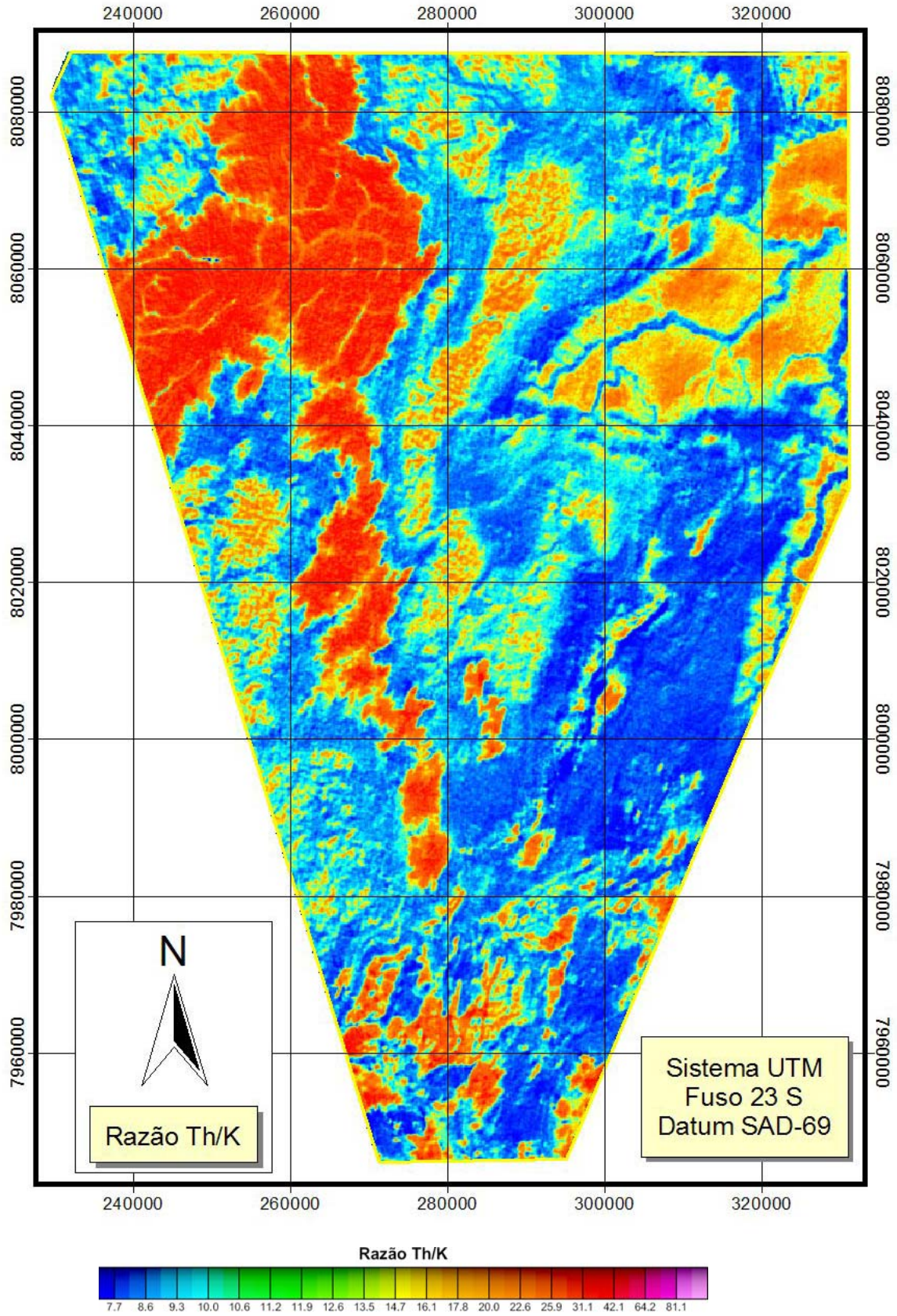


Figura A1.6: Imagem da Razão Th/K.



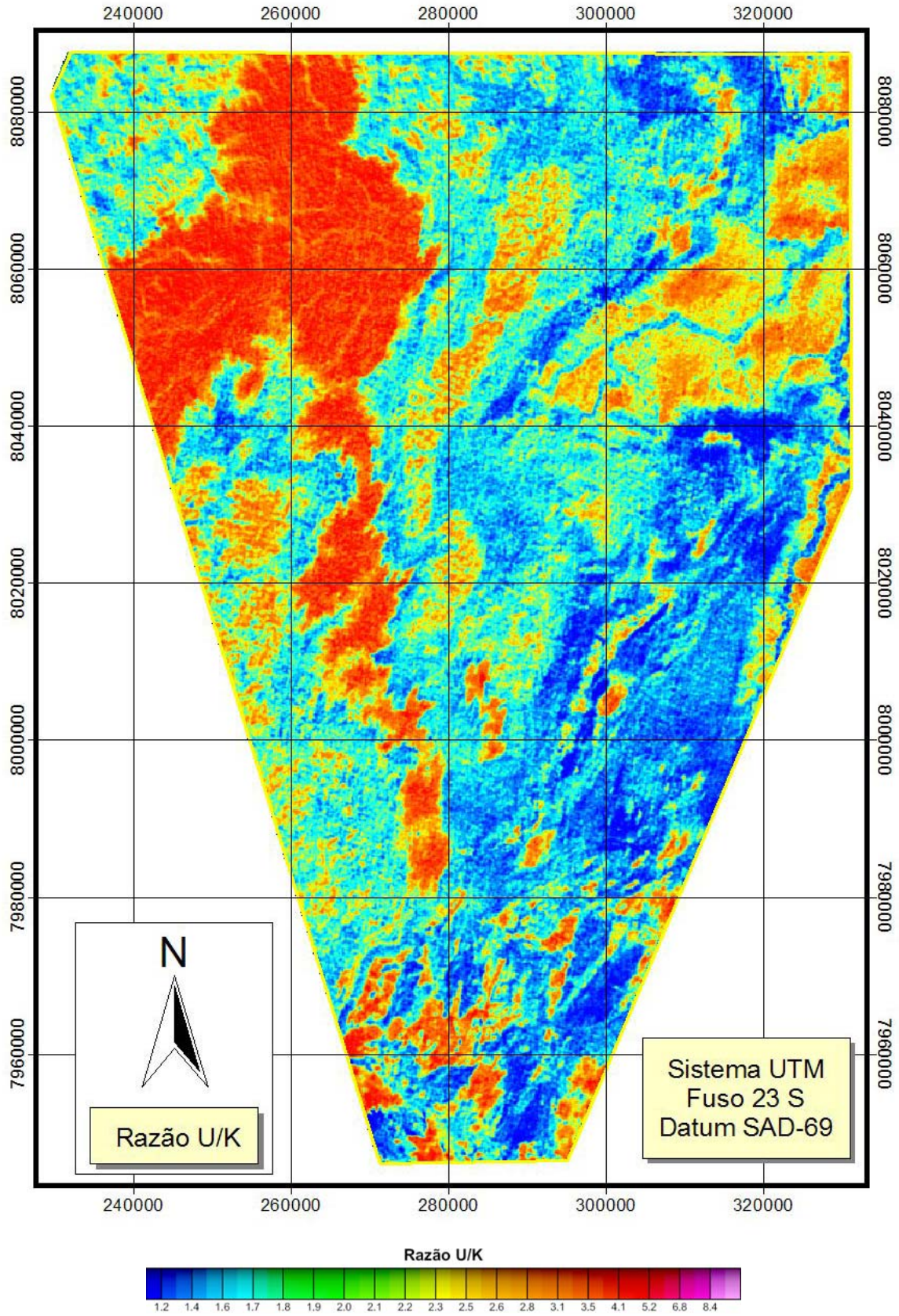


Figura A1.7: Imagem da Razão U/K



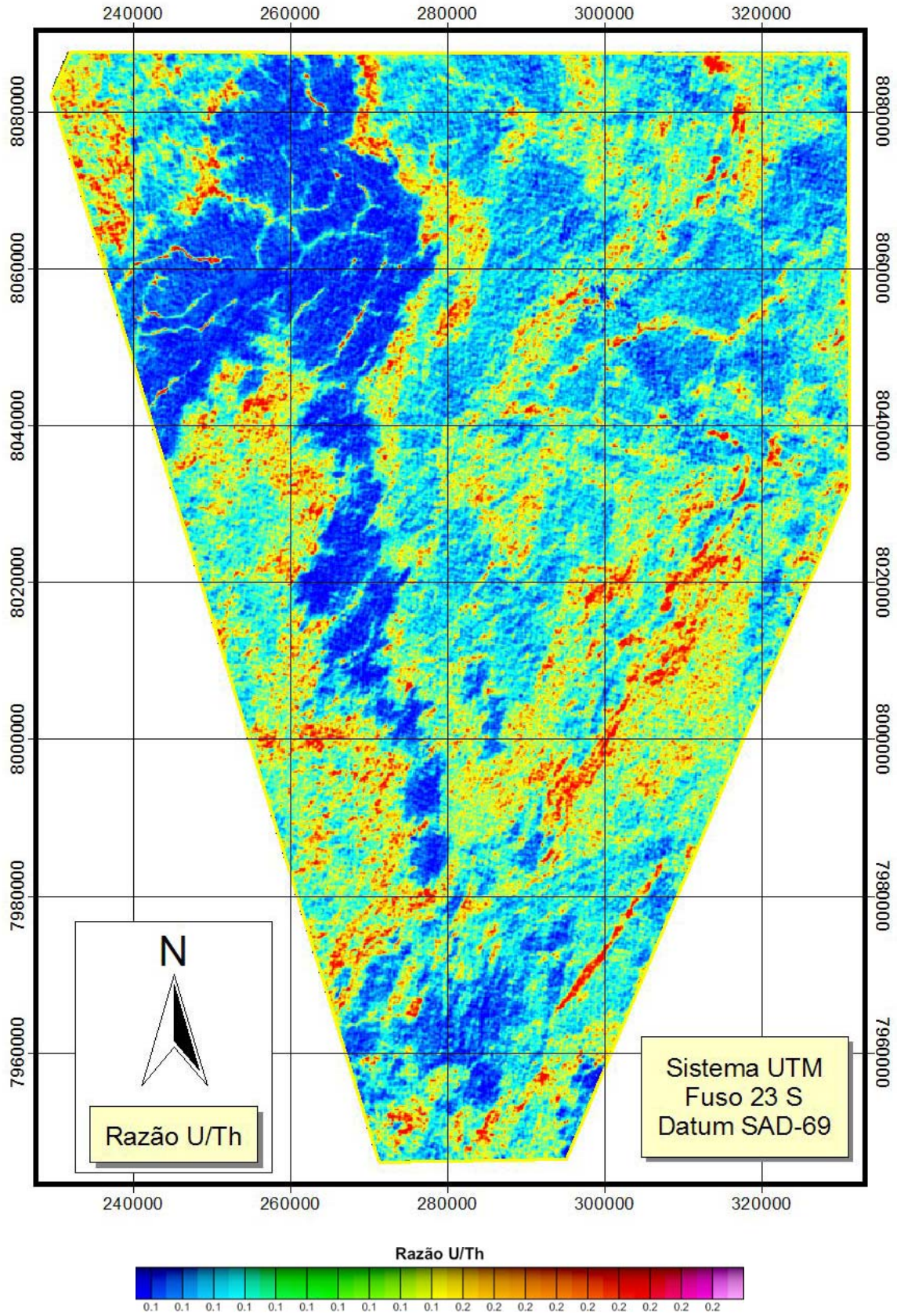


Figura A1.8: Imagem da Razão U/Th.

## **Anexo II: Considerações Teóricas**

---

## A2 ANEXO II: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

### A2.1 - MAGNETOMETRIA

O método magnetométrico avalia a variação da concentração de magnetita (série magnetita-titanomagnetita) por meio das variações do campo magnético local, gerada pelos materiais de superfície (ex. solos) e de subsuperfície (ex. rochas). A causa dessa variação é explicada pela resposta dos materiais à influência de um campo magnético externo que, em magnetometria, é o campo magnético terrestre. Essas respostas estão fundamentalmente associadas à composição dos materiais em questão e são definidas a seguir:

- *Diamagnetismo*: ocorre em materiais com baixa susceptibilidade magnética, apresenta baixa intensidade e ocorre em oposição ao campo externo;
- *Paramagnetismo*: apresenta baixa intensidade, mas ao contrário do anterior, possui sentido igual ao do campo;
- *Ferromagnetismo*: é de grande intensidade e ocorre no sentido do campo externo.

Os fenômenos acima descritos são o resultado da interação do campo magnético dos átomos com o campo magnético externo. O movimento de um elétron gera um momento magnético que, na ausência de um campo magnético externo, seria anulado pelo momento de outro elétron que compõe o par e viaja em sentido contrário. Na presença de um campo externo, a velocidade dos momentos é aumentada se este estiver no mesmo sentido do campo, ou diminuída, se estiver em sentido contrário. Essa diferença de velocidade entre os momentos magnéticos dá origem ao diamagnetismo.

No caso do paramagnetismo, o efeito do desemparelhamento dos pares de elétrons é o responsável pela criação deste fenômeno, que supera o diamagnetismo. Assim, o paramagnetismo possui a mesma direção do campo externo.

Quando um material paramagnético apresenta alinhamento espontâneo dos momentos, ele é chamado de ferromagnético. Mesmo na ausência de um campo externo, um material paramagnético pode apresentar magnetização espontânea, mas quando existe um campo externo, o alinhamento se dá no sentido deste.

As rochas apresentam principalmente dois tipos principais de magnetização: Induzida e Remanescente (ou Remanente). É importante considerar ainda, a magnetização viscosa, que é a mudança gradual da polarização de acordo com a variação do campo magnético terrestre, como um outro tipo.

Outra propriedade que influencia na resposta magnética é o tamanho dos domínios magnéticos dos cristais que compõem as rochas em questão. Esses domínios podem variar de acordo com a composição do material e do tamanho dos cristais, sendo que em um cristal de dimensões iguais a  $0,1 \mu\text{m}$  existe pelo menos dois domínios magnéticos.

As propriedades que podem ser obtidas pelo método magnético são a *densidade do fluxo magnético* ou *indução magnética*, a *força do campo magnético*, e a *permeabilidade magnética do meio*.

A densidade do fluxo magnético ( $B$ ) é a medida da proximidade das linhas de força de um magneto. É dada em submúltiplos do *tesla* (nT, geralmente) e em unidades do SI é expresso por *weber.m<sup>-2</sup>*. No sistema cgs, o nanotesla (nT) é numericamente equivalente ao gama.

A força do campo magnético é dada em  $\text{A.m}^{-1}$  (ampéres por metro) e o valor unitário nesta unidade equivale ao campo gerado no centro de um elo de fio de raio  $r$ , pelo qual passa uma corrente  $I$ , tal que  $H=i/2r$ .

A permeabilidade magnética é dada pela relação entre o campo magnético ( $H$ ) e a indução magnética ( $B$ ), na forma  $B = \mu H$ . Para a água, ar e vácuo, a permeabilidade magnética tem valor de aproximadamente  $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb.A}^{-1}.\text{m}^{-1}$ .

Outras duas medidas de magnetismo são importantes citar: a susceptibilidade magnética  $\kappa$  e a intensidade da magnetização  $J$ , ambas propriedades do material investigado (ex. rochas e solos).

O campo magnético terrestre (Figura A2.1) é gerado por movimentações de cargas elétricas no núcleo da Terra, composto essencialmente de níquel e ferro. Acredita-se que esse movimento se dá a partir de correntes de convecção naquela região.

A explicação do comportamento do campo magnético é calcada na teoria do dínamo auto-sustentado, formulada em meados do século passado, a qual define que as

correntes elétricas que transitam com a porção líquida do núcleo, seguem um campo magnético primordial e poloidal. A convecção térmica, alimentada pelo calor gerado a partir do decaimento radiométrico de alguns elementos, auxilia na movimentação do núcleo externo e cria um campo magnético toroidal. Os dois campos (poloidal e toroidal) se interagem e formam o campo magnético terrestre (Figura A2.2). Assim, o campo inicial cria o secundário e a convecção mantém o movimento de cargas, gerando um sistema auto-alimentado.

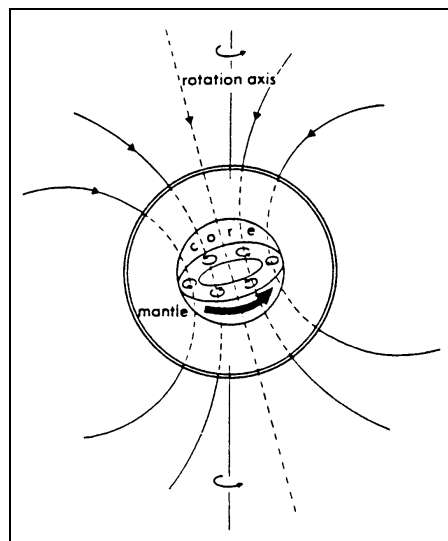


Figura A2.1 – Campo Geomagnético (Reynolds, 1997).

O campo magnético terrestre, apesar de ser relativamente estável ao longo de alguns anos, varia com o tempo e os pólos apresentam uma trajetória errática na superfície do planeta. Essa variação é prevista pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), que é obtido a partir de previsões quinquenais, enquanto o DGRF (*Definitive Geomagnetic Reference Field*) é a variação medida do campo.

A medida do campo magnético na superfície da Terra é o resultado do campo magnético terrestre, da magnetização dos minerais que compõem os cinco primeiros quilômetros da crosta terrestre, aproximadamente, e de campos externos à Terra, gerados nas camadas gasosas da atmosfera e pelo sol (Figura A2.3).

As camadas gasosas que são capazes de gerar campo magnético são a ionosfera, que contém uma pequena quantidade de íons, e a magnetosfera, composta essencialmente por íons.

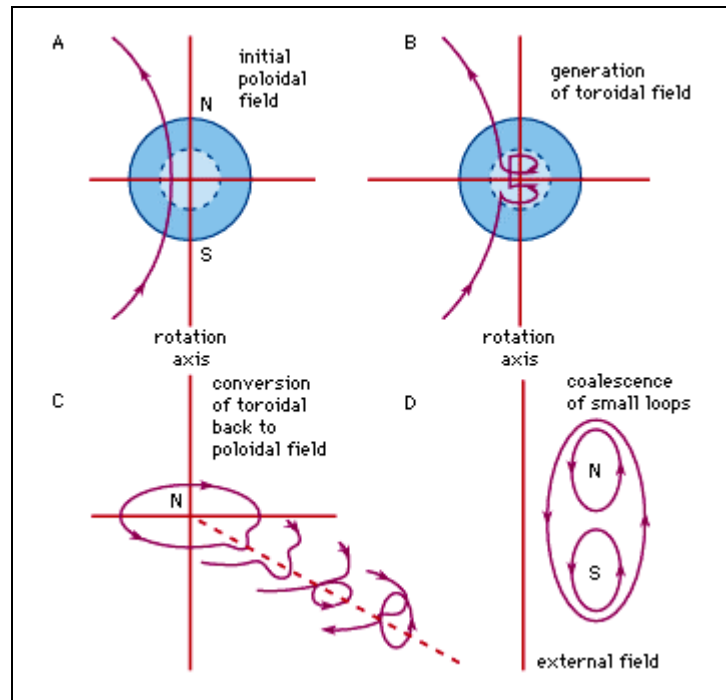


Figura A2.2: Representação da interação dos campos magnéticos poloidal e toroidal.  
 (Fonte: [http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/dynamo\\_effect.html](http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/dynamo_effect.html))

A influência do sol é expressa de duas maneiras: variação diurna e tempestades solares. A primeira é a variação causada pelo aquecimento da ionosfera. É contínua, tem maior valor quando do zênite solar e normaliza-se quando o sol está oculto. A segunda é esporádica e aleatória, porém de grande intensidade, capaz de inviabilizar o uso de alguns equipamentos eletrônicos, inclusive o magnetômetro.

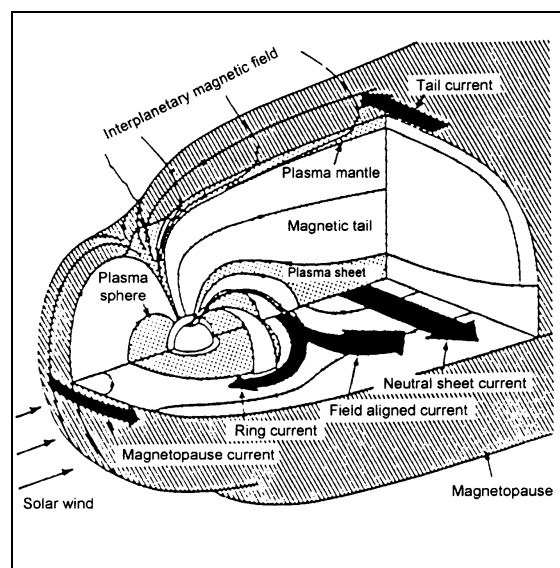


Figura A2.3 – Campo magnético externo (Reynolds, 1998).

As reduções são correções executadas para se obter a informação desejada, uma vez que a medida do campo magnético inclui a influência dos três fatores já citados: campo magnético terrestre, magnetização das rochas e campos magnéticos externos.

Os produtos magnetométricos são obtidos a partir do campo magnético total, campo magnético residual e do campo magnético anômalo. No primeiro, os dados são apresentados na forma como foram coletados, sem a remoção de tendências regionais, como no caso do campo magnético residual. Neste, é calculada uma superfície de tendência a partir do próprio conjunto de dados coletados.

O campo magnético anômalo é o resultado da operação de subtração entre os dados brutos e um valor de referência, que é comumente definido pelo IGRF ou pelo DGRF.

A partir dos campos iniciais supra-citados, pode-se obter um produto extremamente útil, denominado Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Este produto pode ser definido conceitualmente como a soma das três derivadas direcionais do campo magnético. Em termos de análise de sinais, a parte imaginária da função do campo é definida pela derivada da componente vertical, enquanto a parte real é representada pela derivada das duas componentes horizontais. Assim, a função pode ser escrita como:

$$\vec{A}_n(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{y} + i \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{z}$$
$$n = 0, 1, 2, \dots$$

Na função acima,  $n$  representa a ordem do sinal analítico e  $M$  é o campo magnético.

Diversos outros produtos podem ser gerados a partir dos dados do campo magnético, porém neste trabalho somente a ASA foi utilizada. A escolha da ASA foi feita por causa da sua relativa simplicidade de aquisição, pela capacidade de se extrair um valor que quantifique as anomalias geradas em subsuperfície e pelo fato de não sofrer influência da magnetização remanente.



## A2.2 GAMAESPECTROMETRIA

A radiação gama faz parte do espectro eletromagnético, possui energia, frequência e, por conseguinte, comprimento de onda discretos. A radiação tem origem nos elementos químicos naturais e artificiais e é amplamente utilizada em várias áreas do conhecimento.

Em geociências, a geocronologia e a gamaespectrometria são disciplinas que, de dito de uma forma simplória, se utilizam dos radioelementos para estimar idades e os composição dos materiais de superfície (rochas e solos), respectivamente.

Os elementos químicos por vezes apresentam isótopos instáveis e, no caminho natural ao estado de equilíbrio, estes emitem partículas tais como prótons, elétrons ou pósitrons, como forma de liberarem a energia excedente, definida pela equação:

$$E = hf = hc/\lambda,$$

onde E = energia da radiação; f = frequência;  $\lambda$  = comprimento de onda; e c = velocidade da luz.

Os tipos de decaimento radiométrico podem ser de vários modos. Dentre os principais, podemos citar:

**Alfa:** saída de 2 prótons e dois nêutrons do núcleo;

**Beta<sup>-</sup>:** emissão de 1 carga negativa (elétron);

**Beta<sup>+</sup>:** emissão de 1 carga positiva (pósitron);

**Captura de elétron:** ocorre quando um núcleo absorve um elétron, emitindo uma radiação eletromagnética de baixa energia, que equilibra a diferença de carga;

**Fissura Espontânea:** é a “quebra” de um átomo em dois, de mais baixa energia, na qual o excesso de energia é dissipado na forma de radiação gama.

Os diferentes tipos de decaimento irão determinar os átomos que se formarão a partir do radionuclídeo inicial. Combinações de diferentes tipos de decaimento podem ser formadas, gerando dois ou mais elementos-filhos diferentes a partir de um mesmo elemento-pai. A meia-vida do elemento-pai permanece a mesma, independentemente dos tipos de decaimento observados.

Da mesma forma, seqüências de diferentes decaimentos podem gerar diferentes tipos de radiação, com outros elementos-filhos radioativos. No caso de um sistema fechado, os radionuclídeos recém formados tendem a entrar em equilíbrio entre si e com o radionuclídeo inicial, de forma a igualar a atividade de todos os elementos da série. Daí surge a possibilidade da estimativa da concentração inicial do elemento-pai a partir de um elemento-filho.

A interação da radiação gama com a matéria se dá pela colisão de um fóton de raios gama e um elétron de um átomo e dependendo da energia do fóton, pode ocorrer de três formas predominantes:

**Efeito Fotoelétrico:** dá-se a partir da total absorção da energia do fóton pelo elétron. Este tipo de interação predomina quando se trata de um fóton de baixa energia ( $< \sim 0,1$  MeV);

**Espalhamento Compton:** quando os fótons têm energia um pouco mais elevada (0,1 a 10 MeV), a interação é originada principalmente pela perda de parte da energia que o fóton sofre pelo desvio de sua trajetória após a colisão com o elétron;

**Formação de Par:** no caso de fótons de alta energia ( $> 10$  MeV), a maioria fica presa ao elétron após a colisão, formando um par elétron-pósitron;

Em se tratando de levantamentos gamaespectrométricos de fontes naturais, como de solos e rochas, o Espalhamento Compton é o principal fenômeno observado de interação da radiação gama com a matéria.

Os sinais gamaespectrométricos possuem alcance através do ar limitado a algumas centenas de metros, podendo ser fortemente afetados por variações climáticas. Esses efeitos são mais conspícuos nos levantamentos aerogamaespectrométricos.

Como a penetrabilidade da radiação é inversamente proporcional à densidade do meio, qualquer variação na matéria contida entre o emissor e o sensor afetará significativamente a captação dos raios gama. Vegetação densa, umidade do solo, variações de temperatura atmosférica (que influencia a densidade do ar) e umidade relativa, presença de nuvens e neve são alguns dos fatores ambientais que podem prejudicar o levantamento gamaespectrométrico. Além desses, o fenômeno de inversão térmica pode impedir a dissipação do radônio, o que pode acarretar falseamento das medidas. A precipitação pluviométrica pode trazer de volta ao solo átomos de radônio

agregados a partículas de poeira, o que sugere a execução de levantamentos em períodos não-chuvosos, ou algumas horas após uma chuva.

Além dos fatores supra-citados, adicionam-se os efeitos de medida causados por terrenos com grande variação topográfica, que não são exclusivos dos aerolevantamentos. Por serem projetados para medidas com geometria de superfície de  $2\pi$ , medidas feitas por espectrômetros portáteis em cortes de estradas e próximas a barrancos, ou aerotransportados em vales encaixados e cristas acentuadas também podem ser afetados.

Na gamaespectrometria, os radioelementos de interesse são o potássio (K), o tório (Th) e o urânio (U), além da contagem total (Figura A2.4). Estes radioelementos são adequados para fins de caracterização de materiais de superfície e mapeamento, pois emitem energia suficiente para que sejam detectados pelos equipamentos radiométricos.

A medida do teor desses radioelementos nas rochas e solos se dá pela medida da energia liberada no decaimento radiométrico dos mesmos. Os elementos K, Th e U são os que apresentam abundância relativamente alta na superfície da Terra, permitindo que a energia emitida no decaimento ou na série de decaimento seja captada pelos sensores gamaespectrométricos. Como a relação entre a abundância dos isótopos de um elemento é conhecida, é possível calcular a concentração de um elemento a partir de apenas um isótopo.

No caso do potássio, a medida é feita com certa precisão, pois a sua série de decaimento envolve apenas dois elementos ( $^{40}\text{K}$  e  $^{40}\text{Ar}$ ). A energia da transformação do isótopo  $^{40}\text{K}$  em  $^{40}\text{Ar}$  é liberada na forma de radiação gama e tem valor igual a 1,46 MeV.

O tório tem uma série de decaimento mais complexa, se comparada com a do potássio. Na natureza, o tório é representado pelo isótopo  $^{232}\text{Th}$ , que decai para o  $^{208}\text{Pb}$ , numa série onde

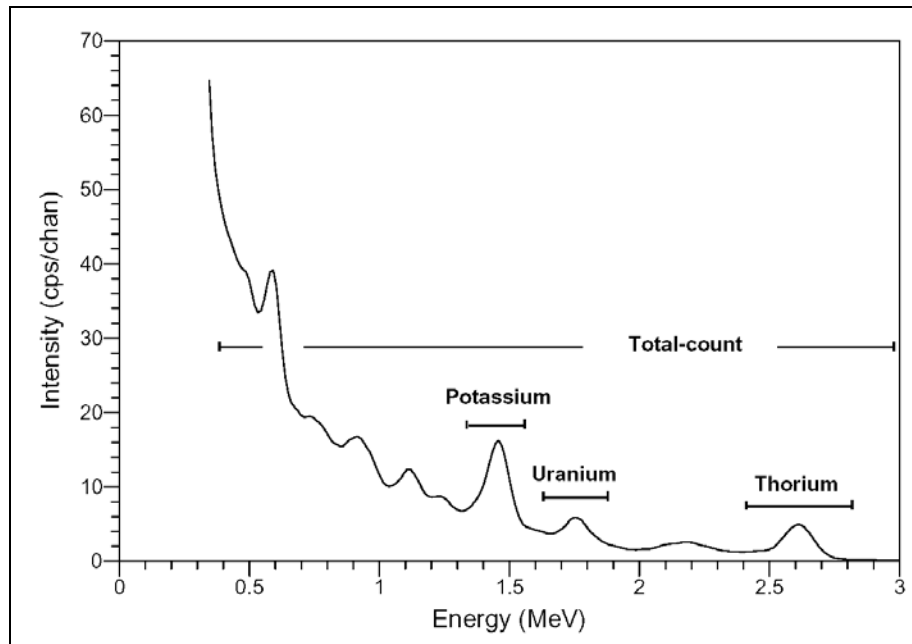


Figura A2.4: Espectro dos radioelementos e da contagem total. (IAEA, 2003).

Os produtos gerados a partir dos dados gamaespectrométricos são os canais de K, Th e U, além do canal de contagem total, que abrange grande parte do espectro gamaespectrométrico.

Uma técnica muito utilizada em gamaespectrometria é a razão entre os canais. O objetivo de se fazer estas razões é a eliminação de ruídos de efeito multiplicativo ou tenham a mesma origem nas imagens a serem operadas. Distorções causadas pelo efeito da topografia são reduzidas por esta técnica simples e rápida.

Os produtos adquiridos por aerogeofísica são representados em forma de imagens ou mapas de isolinhas. As imagens permitem uma visualização geral melhor, enquanto os mapas de isolinhas são muito utilizados para se observar padrões de textura e anomalias de pequeno porte.

Outra forma de representação são as composições coloridas (ou em falsa-cor), que podem ser elaboradas nos diversos espaços de cores. As composições nos espaços RGB (Red-Green-Blue) e CMY (Cyan-Magenta-Yellow) são as mais comuns, porém o uso do IHS (Intensity-Hue-Saturation) seja interessante nos casos onde se deseja efetuar fusão de imagens com diferentes resoluções espaciais e/ou de naturezas distintas.

Processamentos e equipamentos modernos permitem que sejam adquiridos dados radiométricos em 256 ou mais canais, o que aumenta a qualidade dos produtos,

além de permitir o uso individual de cada canal. Esta divisão do espectro possibilita o uso de técnicas de processamento de imagens hiperespectrais de sensoriamento remoto.

Por exemplo, com base na técnica de Principais Componentes, os produtos oriundos de dados em 256 ou mais canais podem ter sua qualidade aumentada pela supressão do ruído.

Enfim, os dados gamaespectrométricos, apesar de todas as limitações, são ferramentas de suma importância nas geociências, pois é o método que investiga as variações dos tipos litológicos e de solos da superfície, possibilitando uma correlação relativamente fácil em campo.