

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MORIÁ CAROLINE DE ARAÚJO

**ESTUDO GEOFÍSICO NA SUÍTE *VAUTHIER* - PORÇÃO NORDESTE DE DOM
PEDRITO - RS**

**Caçapava do Sul
2016**

MORIÁ CAROLINE DE ARAÚJO

**ESTUDO GEOFÍSICO NA SUÍTE VAUTHIER - PORÇÃO NORDESTE DE DOM
PEDRITO - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geociências.

Orientador: Maxmilian Fries

**Caçapava do Sul
2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

d663e de Araújo, Moriá Caroline

Estudo Geofísico na Suíte Vauthier - Porção Nordeste de Dom Pedrito - RS / Moriá Caroline de Araújo.

85 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2016.

"Orientação: Maximilian Fries".

1. Aerogeofísica. 2. Magnetometria. 3. Suíte Sub-Vulcânica Vauthier. I. Título.

MORIÁ CAROLINE DE ARAÚJO

**ESTUDO GEOFÍSICO NA SUÍTE VAUTHIER - PORÇÃO NORDESTE DE DOM
PEDRITO - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geociências.

Orientador: Maximilian Fries

Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries Orientador
UNIPAMPA

Profa. Dra. Cristiane Heredia Gomes
UNIPAMPA

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory
UNIPAMPA

Dedico esta dissertação aos meus amados pais,
Márcio e Regina, maiores fomentadores da
busca da minha felicidade e sucesso.

AGRADECIMENTO

Agradecimento especial aos meus pais, Márcio e Regina, por serem meus suportes e base da minha vida. Por serem incentivadores da busca dos meus objetivos e sonhos. Por em momentos de necessidade serem rígidos e severos, me ensinando o correto e o errado, mas ao mesmo tempo acolhedores. Além de serem meus exemplos e inspiração de vida, por serem pessoas batalhadoras e honestas nesse mundo.

Ao meu irmão Samuel, por muitas vezes discretamente, me incentivar e me apoiar em minhas decisões, além de me mostrar que a paciência e calma são habilidades imprescindíveis hoje.

Aos meus primos Nathália e Bernardo que, mesmo distantes em espaço, suprimiram isto de forma carinhosa, mostrando que eu poderia contar com eles independente de hora e lugar. Enfim, agradeço a todos os membros da minha família que se fizeram presente nesses 5 anos de estudo longe de casa.

Ao meu amor, Jean de Carli, por antes de tudo ser meu amigo, confidente, protetor, apoiador e meu porto seguro em Caçapava do Sul. Por me mostrar partes de mim, que eu mesma não sabia da existência, por me aguentar e suportar minhas variações de humores, além de me fazer sorrir em momentos difíceis e tristes.

Ao meu orientador, Maximilian Fries, por toda a confiança em meu trabalho, e por me instigar a busca a perfeição. Por além de ser meu orientador, ser meu professor de uma cadeira em especial, possibilitando a minha graduação dentro do tempo previsto e por todas as suas dicas, concelhos e indicações.

A todos os meus amigos, especialmente Maria, Mila, Vini, Jéssica, Flávia, Nati, Helena, Laís e Felipe, por se fazerem presentes e essenciais nesses cinco anos.

A toda equipe da Votorantim Metais Holding, em especial João Boniatti e Rodrigo Travassos, que foram essenciais para este trabalho e por todos os ensinamentos. E as demais pessoas, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a minha formação profissional e pessoal.

“O segredo não é correr atrás das borboletas,
e sim cuidar do seu jardim, para que
elas venham até você”.

D. Elhers

RESUMO

Nos últimos anos, uma grande quantidade de dados geofísicos terrestres e aéreos vem sendo integrado a dados geológicos no Brasil, a fim de detectar e analisar discontinuidades e limites litológicos, servindo, desta forma, como subsídio na caracterização de uma área. A região de Dom Pedrito, metade sul do Estado do Rio Grande do Sul é tradicionalmente conhecida pelas ocorrências minerais de cobre e ouro. Esta vem, ao longo dos anos, sendo explorada por empresas de grande porte tendo, recentemente, uma intensificação em projetos exploratórios para viabilização de exploração das jazidas em avaliação. Estas ações viabilizam para a região mão-de-obra, divisas e oportunidades em diferentes áreas de estudo especialmente na geofísica. O Projeto Aerogeofísico do Rio Grande do Sul, executado em 2010 pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), forneceu informações geológicas que, integrados a dados geofísicos terrestres, consiste na proposta desta pesquisa. O objetivo principal é integrar e interpretar dados geofísicos e geológicos, caracterizando feições e domínios correlacionáveis a diferentes unidades geológicas, definir limites laterais e em profundidade das litologias e discontinuidades. Esta extensão, é descrita como Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier*, onde encontram-se corpos de sequência máfica-ultramáfica. A integração geológica com dados geofísicos (modelos lito-geofísicos) e definição de domínios, permite a elaboração de teorias e hipóteses acerca da articulação e continuidade de estruturas e feições em diferentes níveis de profundidade no local.

Palavras-Chave: Aerogeofísica; Magnetometria; Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier*.

ABSTRACT

In recent years, a large amount of geophysical data on land and air is being integrated with the geological data in Brazil, in order to detect and analyze discontinuities and boundaries, lithological, serving this way as an aid in the characterization of an area. The region of Dom Pedrito, southern half of the State of Rio Grande do Sul is traditionally known by the occurrences of minerals of copper and gold. This has, over the years, being exploited by large companies and, recently, an intensification in the project scoping for the feasibility of exploitation of the deposits in the assessment. These actions provide for the region's labour, foreign exchange and opportunities in the different areas of study especially in the geophysics. The Project aerogeophysical Project of Rio Grande do Sul, executed in 2010 by the Research Company of Mineral Resources (CPRM), provided geological information, integrated geophysical data on land, consists in the proposal of this research. The main goal is to integrate and interpret geophysical data and geological, featuring features and domains correlate the different geological units, to define lateral limits and depths of the structure, and discontinuities. This extension, is described as a Suite of Sub-Volcanic Vauthier, where are the bodies of the mafic sequence. The integration of geological with geophysical data (models lito-geophysical) and definition of domains, allows the development of theories and hypotheses about the articulation and continuity of structures and features at different levels of depth.

Keywords – Aerogeophysical, Magnetometry, Suite of Sub-Volcanic Vauthier.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS	12
3	JUSTIFICATIVA	12
4	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
5	CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
5.1	Geologia Regional.....	14
5.1.1	Domínio Taquarembó.....	16
5.1.2	Complexo Granulítico Santa Maria-Chico	16
5.2	Geologia Local	17
5.2.1	Suíte Sub-Vulcânica <i>Vauthier</i>	17
5.3	Trabalhos Anteriores – Área de Estudo	18
6	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
6.1	Gamaespectrometria	19
6.1.1	Radioatividade Básica	19
6.1.2	Interação da Radiação Gama com a Matéria.....	20
6.1.3	Decaimento Radioativo.....	20
6.1.4	Séries Radioativas	21
6.1.5	Caracterização dos radio-elementos nos estudos geológicos.....	21
6.2	Magnetometria	22
6.2.1	Momento e Força Magnética	22
6.2.2	Campo Magnético e Indução Magnética	23
6.2.3	Campo Magnético Terrestre.....	24
6.2.4	Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF)	25
6.2.5	Magnetismo e Susceptibilidade de Rochas e Minerais	25
6.2.6	Magnetização das Rochas.....	26
7	MATERIAIS E MÉTODOS	26
7.1	Equipamentos	26
7.2	Aquisição de Dados	28
7.2.1	Levantamento Aéreo - Projeto aerogeofísico CPRM (2010).....	28
7.2.2	Aquisição Terrestre	30
7.3	Correções	30
7.3.1	Aerogamaespectrometria.....	30
7.3.2	Aeromagnetometria e Magnetometria Terrestre.....	36
8	PROCESSAMENTO DE DADOS	36
8.1	Validação dos Dados	36
8.1.1	Dados Aéreos	36
8.1.2	Dados Terrestres	37
8.2	Filtragem dos Dados e Mapas Geofísicos.....	37
8.2.1	Aerogamaespectrometria	37

8.2.2	Aeromagnetometria e Magnetometria Terrestre.....	39
8.3	Modelagem Magnetométrica	44
8.3.1	Modelagem inversa.....	44
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
9.1	Mapas geofísicos - Aerogamaespectrometria.....	44
9.1.1	Modelo Digital de Terreno - MDT	44
9.1.2	Contagem de Urânio (ppm)	46
9.1.3	Contagem de Tório (ppm)	46
9.1.4	Contagem de Potássio (%).....	46
9.1.5	Contagem Total (ppm).....	46
9.1.6	Razão U/Th (ppm)	51
9.1.7	Razão U/K (ppm).....	51
9.1.8	Razão Th/K (ppm)	51
9.1.9	Parâmetro F.....	55
9.1.10	Ternário.....	55
9.2	Mapas Geofísicos - Aeromagnetometria	59
9.2.1	Campo Magnético Anômalo Total	59
9.2.2	Redução ao Polo Magnético - RTP	59
9.2.3	Amplitude do Sinal Analítico	59
9.3	Magnetometria Terrestre	64
9.3.1	Modelo Digital de Terreno - MDT	64
9.3.2	Campo Magnético Anômalo Total - CMA	64
9.3.3	Regional e Residual.....	64
9.3.4	Redução ao Polo Magnético - RTP	68
9.3.5	Amplitude do Sinal Analítico - ASA.....	68
9.3.6	Primeira Derivada Vertical – 1DV.....	68
9.3.7	Derivadas Direcionais – X, Y e Z.....	68
9.3.8	Continuação para Cima.....	73
9.3.9	Continuação para Cima e Passa Baixa	74
9.3.10	Redução ao Polo Magnético (RTP) e Passa Baixa	75
9.4	Análise Semi-Quantitativa	76
9.4.1	Dados Aeromagnetométricos	76
9.4.2	Dados Terrestres	77
9.4.3	Deconvolução de Euler	78
9.4.4	Dados Magnetométricos Terrestres	80
9.5	Modelagem Inversa – VOXEL	80
10	CONCLUSÃO	83
	APÊNDICE A.....	90
	APÊNDICE B.....	90

1 INTRODUÇÃO

No fim do século XVIII, a descoberta de metal na região de Lavras do Sul, cidade vizinha a Dom Pedrito, serviu como impulso para as sucessivas explorações auríferas de garimpeiros e companhias de origem inglesa e belga em toda a extensão. Desde 1950, diversos pesquisadores analisam a região em busca de informações sobre os depósitos minerais de cobre (Cu), ouro (Au), zinco (Zn), prata (Ag) e chumbo (Pb), também economicamente viáveis (Iglesias, 2000).

A região de Dom Pedrito, onde localiza-se a área de estudo, situa-se numa das fronteiras do Escudo Sul-Rio-Grandense, na porção sudeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), tendo grande importância no cenário de exploração devido a peculiar característica de gênese e arcabouço estrutural das litologias de origem pré-cambriana (Gastal, 2006).

O uso da geofísica na caracterização, delimitação e mapeamento em profundidade de estruturas é reconhecido internacionalmente e têm se tornado cada vez mais rotineiro em programas de exploração de pequenas e grandes empresas no mercado da mineração (Iglesias, 2000).

Oldenburg et al. (1997) realizaram a análise, a modelagem e a inversão conjunta de dados geofísicos (potencial espontâneo - IP, métodos eletromagnéticos - EM, magnetometria) e geológicos com o objetivo de alcançar um controle da distribuição de minérios no depósito de Cu-Au pórfiro de Mt. Milligan (EUA). Fonseca (2002) defende que o uso de técnicas de modelagem de dados 3D em pesquisa de avaliação mineral de detalhe para subseqüentes campanhas de sondagem, definem a continuidade espacial de estruturas mineralizadas. Tallarico (2002), em um estudo de depósitos Fe-Cu-Au-U-ETR da Província Carajás, mostra que dados aerogeofísicos, quando pré-processados adequadamente, funcionam como ferramentas para reconhecimento de tramas estruturais e litológicas complexas, incluindo aproximações para seleção de alvos de interesse metalogenético.

Considerando as premissas acima citadas, um estudo geofísico utilizando dados aéreos de magnetometria e gamaespectrometria, conjuntamente com aquisição de dados terrestres magnetométricos de detalhe associados a informações geológicas e estruturais, possibilitam a análise e caracterização de limites litológicos, estruturas e geometrias em diferentes níveis de profundidade do local de estudo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo consiste na detecção e análise de descontinuidades e limites litológicos por meio de dados geofísicos terrestres e aéreos na região nordeste de Dom Pedrito, denominada de Suíte *Vauthier*. Especificamente, pretende-se:

- Obter contrastes litológicos e estruturais de detalhe em níveis profundos;
- Refinar o arcabouço estrutural e litológico;
- Detectar zonas magnetométricas e gamaespectrométricas anômalas associadas a ocorrências minerais;
- Definir domínios a partir das feições e anomalias detectadas por meio da magnetometria e gamaespectrometria a partir de mapa litogeofísico, seções e mapas de superfície 3D integrados.

3 JUSTIFICATIVA

Os métodos geofísicos utilizam o contraste de propriedades físicas entre os materiais (rochas e estruturas) e concentrações minerais para detectar e caracterizar anomalias que permitem a identificação e delimitação de ocorrências, geometria e limites com corpos encaixantes. A magnetometria e a gamaespectrometria são métodos geofísicos que possuem eficácia nestes procedimentos.

A gamaespectrometria consiste na detecção de assinaturas gamaespectrométricas. Estas são detectadas devido à emissão de fontes radioativas (radionuclídeos) presentes em determinados minerais. Possui íntima relação com a geoquímica das rochas e é amplamente utilizada para a caracterização e mapeamento em superfície, uma vez que evidencia a dispersão de elementos e de minerais em rochas alteradas e solos. Fornece uma cobertura completa da superfície, podendo auxiliar na separação de diferentes litologias ou contatos entre rochas (Dickson & Scott, 1997).

A magnetometria utiliza como parâmetro físico medido a susceptibilidade magnética. Esta, interagindo com o campo natural da Terra, gera contrastes ou anomalias decorrentes da variação petrográfica, estruturas das rochas e descontinuidades (juntas, fraturas e zonas de cisalhamento). Ocorrências minerais (depósitos) com elementos metálicos (Cu, Au, Zn, Mb, Co) constituem importantes alvos detectados pelo método. Dentre as litologias mais susceptíveis a apresentar

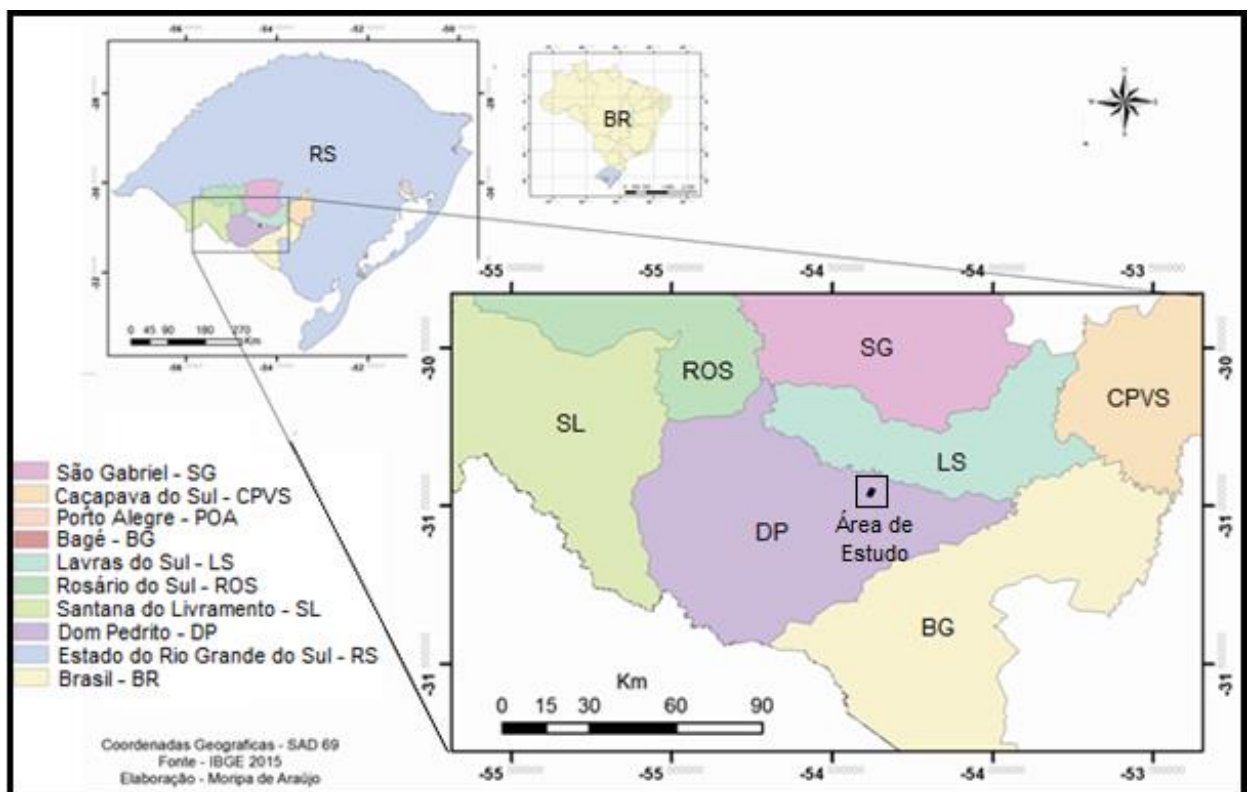
anomalias magnéticas significantes encontram-se as rochas ígneas, em especial máficas e ultramáficas devido ao alto teor de Fe e Mg (Blakely, 1995).

Neste contexto, o presente trabalho na Suíte Vauthier justifica-se, considerando que o método e as abordagens propostas são efetivos para a caracterização, detecção e análise de descontinuidades e limites litológicos na Suíte *Vauthier*.

4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Suíte *Vauthier* situa-se na metade sul do estado do Rio Grande do Sul, entre as cidades de Dom Pedrito e Lavras do Sul. Partindo de Porto Alegre, tem como principal acesso a BR-290 até o entroncamento com a BR-392, sentido Caçapava do Sul. Através da Rodovia Estadual RS-357, acessa-se (aproximadamente 51 km) a cidade de Lavras do Sul, tendo entrada para à área por meio de estradas secundárias municipais, distando aproximadamente 30 km de Dom Pedrito. Esta localização pode ser visualizada pela Figura 1.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Produzido pela Autora.

5 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região proposta situa-se entre a Vila de Torquato Severo e a cidade de Dom Pedrito. Antigamente recebia o nome de Estação *Vauthier*, devido a um ramal de rede ferroviária federal ativado no início do século XX, em virtude da unidade mineira de ouro da época que atualmente encontra-se inativa. A mina explorada na época pertencia à companhia de mineração inglesa Barcellos Mining Company. Esta empresa explorou a região, abrindo galerias e montando um estabelecimento à base de vapor para o beneficiamento de minério de ouro. O minério que foi explorado na localidade é formado por um veio de quartzo piritoso vertical, próximo à superfície e mergulhante para sul em profundidade. Esse veio encontra-se inserido em rochas graníticas sub-vulcânicas (Calógeras, 1938).

Atualmente, a área de exploração se encontra aterrada, restando apenas resíduos de material mineralizado. Nesse local são encontrados blocos e fragmentos de minério formados por: 1) quartzo com pirita, calcopirita, galena e esfalerita; 2) hidrotermalitos com epídoto e carbonato; 3) brechas com sericita, quartzo, pirita e malaquita; 4) hidrotermalitos quartzo-sericíticos com pirita disseminada; 5) granitos; e 6) rochas sub-vulcânicas finas com pirita fina disseminada, pirita em vênulas e em fraturas (Iglesias, 2000).

Análises do percentual de elementos no minério (2,24% Cu; 3,02% Pb; 0,38% Zn; 663ppm Mo; 60ppm Ag e 47,45ppm Au), fizeram a Companhia Brasileira do Cobre elaborar uma campanha de prospecção regional no início de 1990, com o objetivo de caracterizar a viabilização da área para ouro e minerais básicos (Iglesias, 2000).

5.1 Geologia Regional

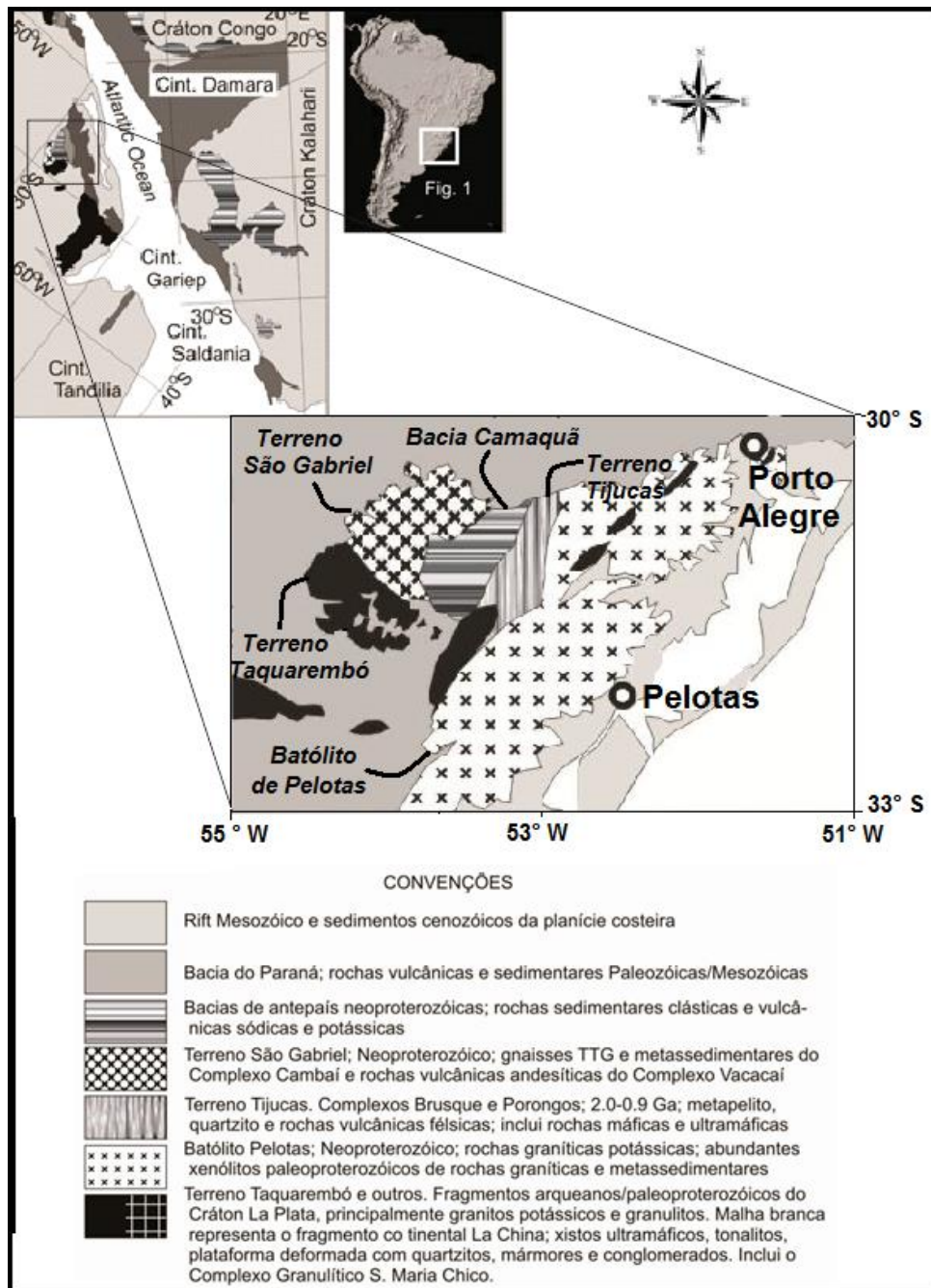
A área de estudo está situada a sudoeste do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG). Este escudo originou-se de processos de geração e deformação de crosta continental que ocorreram principalmente em dois ciclos orogênicos: Ciclo Transamazônico e Ciclo Brasileiro, onde associações de crosta oceânica, microcontinentes e arcos de ilhas em oceanos e margens continentais colidiram sequencialmente contribuindo para o crescimento da porção sul do continente americano (Hartmann *et al.*, 2007).

Chemale Jr. (2000) e Hartmann *et al.* (2007) propuseram uma divisão do ESRG em quatro unidades geotectônicas (Figura 2), baseados na geoquímica, petrografia,

geofísica, geologia isotópica e litoestratigrafia: Terreno Taquarembó, Terreno São Gabriel, Terreno Tijucas e Batólito Pelotas.

A região situa-se próximo do lineamento de Ibaré, que é a divisa entre os Domínios Tectônicos de São Gabriel, a norte, e Taquarembó, a sul. Nesse trabalho, serão tecidas considerações apenas sobre a geologia e a estratigrafia da região que compõe o Domínio Taquarembó (Figura 2).

Figura 2 – Localização das principais unidades geotectônicas do sul do Brasil e do Uruguai.



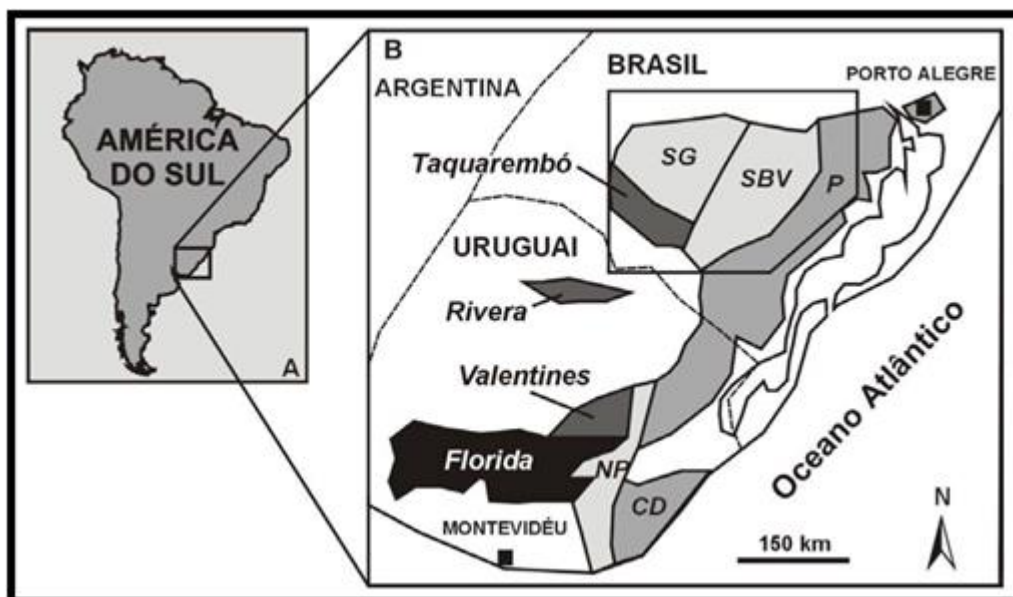
Fonte: Modificado de Hartmann *et al.*, (2007).

5.1.1 Domínio Taquarembó

O Domínio Taquarembó é interpretado como um fragmento do Cráton Rio de La Plata em conjunto com os terrenos Rivera, Valentines e Nico Perez (NP) descritos no Uruguai (Hartmann *et al.*, 2007)(Figura 3).

O domínio é constituído pelo Complexo Santa Maria-Chico, sendo este composto por piroxenitos, harzburgitos, sillimanita gnaisses, mármore e gnaisses cálcio-silicáticos (Hartmann *et al.*, 2007). Cortam esse embasamento paleoproterozóico as suítes Saibro e Santo Afonso, além dos granitos à Suíte *Vauthier*. A foliação metamórfica de alto grau é subvertical e próxima da direção EW, com condições de metamorfismo por volta de 800°C e 10Kbar (Hartmann *et al.*, 2007). Idades U-Pb SHRIMP em zircões mostram idades de acreção dos magmas do complexo granulítico entre 2,5 - 2,1 Ga, sendo o evento colisional/metamórfico gerador dos granulitos em torno de 2,02Ga (Hartmann *et al.*, 1999, 2000).

Figura 3 – Localização do Bloco Taquarembó e dos demais terrenos do Uruguai.



Fonte: Extraída de Chemale Jr. (2000).

5.1.2 Complexo Granulítico Santa Maria-Chico

As rochas do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC), possuem idade metamórfica Sm-Nd de 2100 Ma e idade modelo T_{DM} (Sm/Nd) arqueana. O CGSMC é composto por gnaisses quartzo-feldspáticos (tonalitos e trondjemitos),

gnaisse máficos, anortositos, ultramafitos e rochas supracrustais metamorfizadas em condições de fácies granulito (Hartmann et al., 2000).

O CGSMC está intrudido por rochas graníticas das suítes Santo Afonso, Vauthier e Saibro e por diques ácidos da Formação Acampamento Velho, que correspondem aos Diques Armeiras descritos por Gastal (2015). O CGSMC faz contato a nordeste com rochas contidas no Lineamento de Ibaré (Complexo Ibaré, Formação Maricá e sedimentos gonduânicos da Formação Rio Bonito); a oeste com as rochas vulcânicas intermediárias e ácidas das formações Hilário e Acampamento Velho e com o Monzogranito Santo Antônio; a sudeste com a Suíte Granítica Santo Afonso e Suíte Sub-vulcânica *Vauthier*; e a sudoeste é recoberto pelas rochas sedimentares gonduânicas da Bacia do Paraná, representadas pela Formação Rio Bonito, descrita por Iglesias, (2000).

5.2 Geologia Local

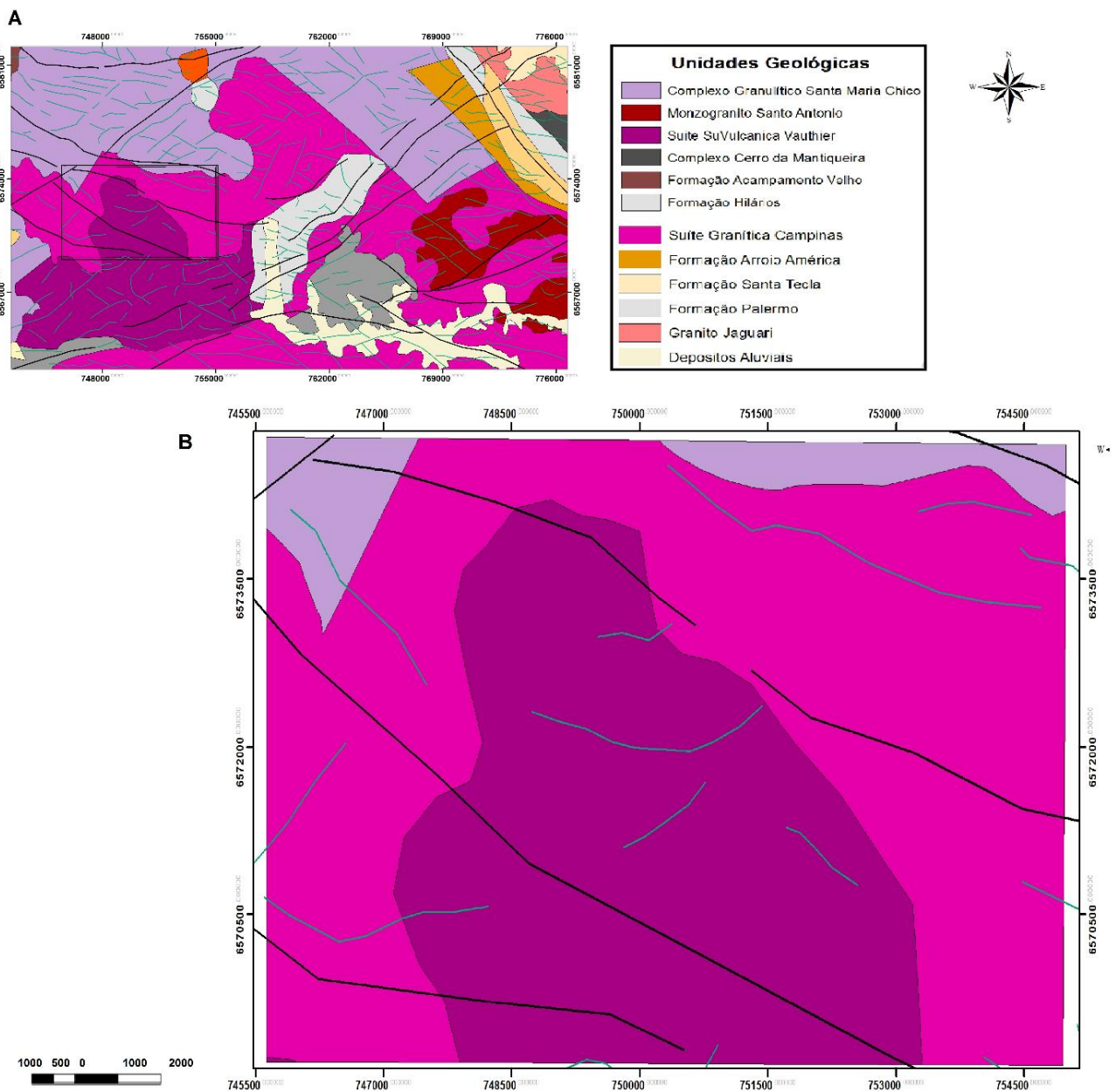
5.2.1 Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier*

A Suíte Sub-vulcânica *Vauthier* (SSV) é constituída por sieno e monzogranitos e por dacitos e riodacitos porfíricos que ocorrem na área da Estação *Vauthier*, orientadas na direção nordeste-sudoeste. As rochas dessa suíte são na maioria porfíricas, contendo na matriz fenocristais de ortoclásio, quartzo, biotita e hornblenda (Camozzato et al., 2013) (Figura 4).

As litologias dessa suíte são separadas em duas seções, uma vez que se têm uma camada de granulitos separando ambas. Como um todo, a SSV é caracterizada como granítica, constituída por hornblenda-biotita monzogranitos. Na área também se observa uma intensa intercalação entre afloramentos de granulitos e sub-vulcânicas, caracterizando provavelmente o topo de uma câmara magmática. Observa-se, independente se a litologia é sub-vulcânicas ou granulítica, a presença de pirita branca, fina, que também ocorre em vênulas e em bolsões, onde apresenta granulação mais grossa (Iglesias, 2000).

Quanto às duas seções divididas pela faixa de granulitos, a porção nordeste tem 500m de largura, perfeitamente distinguível dos granitóides da Suíte Granítica Santo Afonso (com o qual faz contato). Já a porção sudoeste é mais estreita, variando em monzogranito e sienogranito, próximo a antiga mina de ouro Barcellos (Iglesias, 2000).

Figura 4 – Mapa de geologia regional (A) e mapa detalhado da Suíte *Vauthier* (B).



Fonte: Produzido pela Autora.

5.3 TRABALHOS ANTERIORES – ÁREA DE ESTUDO

A Companhia Brasileira do Cobre (CBC) iniciou no início do século XX um projeto de exploração de ouro na área da Estação *Vauthier*, uma vez que esta era uma área que apresentava comportamento anômalo em relação às rochas encaixantes. Jackson et al. (1973), visualizando a possibilidade de existência de depósitos de Cu e associados, similares aos da Minas do Camaquã, gerou o Projeto

aerogeofísico Camaquã, Estado do Rio Grande do Sul, que abrangia a área da Suíte *Vauthier*. Este utilizou gamaespectrometria e magnetometria para classificar e testar modelos analíticos e preditivos, visando a presença de depósitos de elementos metálicos (Cu, Au, Pb, Zn e Ag).

Iglesias (2000), através de dados magnetométricos e aerogamaespectrométricos investigou veios de quartzo e zonas hidrotermalizadas mineralizadas em ouro, resultando em um aprofundamento do conhecimento geológico básico da região e da distribuição das anomalias presentes na área entre Torquato Severo e Dom Pedrito.

Gastal (2006) utilizou a magnetometria e aeromagnetometria para a integração de dados geológicos, geofísicos e geocronológicos das intrusivas que compõem o Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), onde foi possível atingir o objetivo de caracterizar um sistema vulcano-plutônico de subsidência, análogo a exemplos clássicos.

6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

6.1 Gamaespectrometria

A gamaespectrometria é uma técnica geofísica relativamente recente, também conhecida como espectrometria de raios. A origem de toda a técnica surge no momento da descoberta do Raio-X, em 1895, por Roentgen. Ela se baseia na detecção de assinaturas gamaespectrométricas. Estas são detectadas devido à emissão de fontes radioativas naturais (radionuclídeos) presentes em determinados minerais (Arya, 1966).

A gamaespectrometria foi inicialmente utilizada na prospecção de depósitos de urânio. A evolução dos sistemas detectores propiciou a obtenção de dados com qualidade bastante superior e a técnica passou então a ser utilizada com maior abrangência na prospecção de elementos granófiros (Sn, W e outros), elementos raros (Be, Zr, Y e outros), carbonatitos, metais preciosos (Au e Ag) e metais básicos (Cu, Pb, Zn) (Shives et al., 1997).

6.1.1 Radioatividade Básica

Os raios gama tem uma potência maior que as demais partículas, uma vez que este tem um energia penetrativa 100 vezes maior do que a dos raios β . Segundo Minty

(1997), este penetra aproximadamente 30m da rocha. O motivo por não serem desviados por campos magnético é dado por não possuírem carga, apresentando então características de uma onda eletromagnética. Este comprimento de onda é de aproximadamente 3×10^{-12} m e a uma frequência de cerca de 3×10^{19} Hz (Minty, 1997).

6.1.2 Interação da Radiação Gama com a Matéria

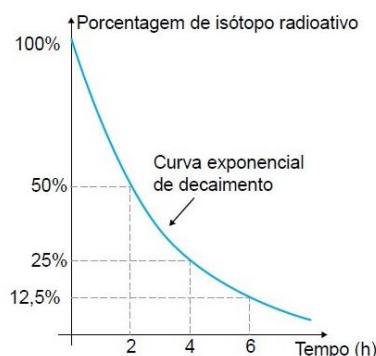
A radiação gama tem a potencialidade de interagir com a matéria, possuindo assim três processos de interação: Efeito fotoelétrico, Espelhamento Compton, Produção de par (Kearey et al., 2002). Estes efeitos são detalhados no Apêndice A.

6.1.3 Decaimento Radioativo

Segundo Arya (1966), quando o núcleo de um átomo emite uma partícula alfa, beta, um raio gama, ou então quando captura um elétron da camada extra nuclear, o processo é chamado de decaimento radioativo. A lei do decaimento radioativo é um fenômeno estatístico resultante de um grande número de eventos, sujeitos a lei da probabilidade. Uma grandeza importante na radioatividade é a meia-vida, uma vez que os elementos que sofrem decaimento radioativo atingem sua meia vida quando tem seus número de átomos reduzidos à metade da quantidade inicial (Telford et al., 1990)(Figura 5).

São conhecidos três tipos de decaimento radioativo: decaimento alfa (α), decaimento beta (β) e decaimento gama (γ). O decaimento pela emissão de uma partícula, como uma partícula alfa ou beta, usualmente leva o núcleo a um estado excitado. Retornando ao seu estado normal, o núcleo emite mais uma partícula, o raio gama (Telford et al, 1990).

Figura 5 – Gráfico representativo de meia vida.



6.1.4 Séries Radioativas

A maioria dos elementos pertencentes às séries radioativas naturais apresentam número atômico entre $Z = 81$ e $Z = 92$ (Arya, 1966). O Urânio, o Tório e o Potássio são elementos de ocorrência natural que produzem energia e intensidade suficientes para serem detectados em levantamento gamaespectrométricos.

As principais fontes de radiação são o ^{40}K e as séries do ^{238}U e do ^{232}Th . Na crosta terrestre, K, U e Th têm abundâncias respectivas de 3%, 3ppm e 12ppm. O ^{40}K corresponde a 0,012% do potássio total, o ^{238}U corresponde a 99,3% do urânio total e o ^{232}Th a 100% do tório total (Wilford et al., 1997). Noventa por cento dos raios gama emanam da camada superficial de solo ou rocha, compreendida entre 0 e 45cm de profundidade, ou seja, obtém-se com informações rasas.

Segundo Arya (1966), estas três séries radioativas apresentam propriedades em comum:

- Todas apresentam uma longa meia-vida;
- Os produtos finais estáveis das três séries, do Tório, do Urânio e do Actínio são isótopos de Chumbo, ou seja, $^{82206}\text{Pb}$, $^{82207}\text{Pb}$ e $^{82208}\text{Pb}$, respectivamente;
- Cada uma das séries apresenta um gás inerte com $Z = 86$. Estes gases são: Torônio ($^{86220}\text{Rn}$), Radônio ($^{86222}\text{Rn}$) e Actínio ($^{86219}\text{Rn}$), respectivamente das séries do tório, urânio e do actínio.

6.1.5 Caracterização dos radio-elementos nos estudos geológicos

A interpretação dos dados gamaespectrométricos auxilia no acréscimo de informações de determinada composição litológicas de uma região, assim como na determinação de regiões com maior ou menor porcentagem de um elemento, na indicação de área para exploração e em mapeamentos geológicos. Isto é possível porque os níveis radioativos das rochas podem ser correlacionados com sua composição mineralógica e forma de ocorrência (Vasconcellos et al., 1994).

É importante considerar para a interpretação de mapas de concentração de Potássio, Urânio e Tório, Contagem Total (CT) e Ternário as características geoquímicas, a cristalografia, a abundância de cada elemento e suas principais ocorrências, pois assim se tem uma resposta melhor.

Uma descrição sobre as principais características dos elementos radiométricos (Potássio, Tório e Urânio) na natureza e sua ocorrência associada aos tipos litológicos é descrita de forma pormenorizada no Apêndice B.

6.2 Magnetometria

A Magnetometria baseia-se na variação do campo magnético terrestres com contraste de potencial do campo em rochas com minerais metálicos. É um método que abrange trabalhos de prospecção e pesquisa mineral, tanto de etapas regionais em forma de aerolevantamentos, como detalhamento em levantamentos terrestres (Pereira & Moreira, 2014).

Cada rocha é magnetizada de acordo com a sua susceptibilidade magnética, que depende da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos presentes. A susceptibilidade influencia a resposta dos materiais na presença de um campo magnético, no caso o campo magnético terrestre por meio de seus elementos vetoriais, fornecendo assim informações da sub-superfície em análise (Kearey et al., 2002).

Medidas mais precisas da intensidade do campo magnético e das suas componentes são efetuadas com equipamentos denominados de magnetômetros. Os levantamentos magnéticos podem ser realizados em terra, no mar e no ar. Geralmente a intensidade do campo magnético é medida em nano tesla (nT) do sistema internacional (SI), onde 1 nT corresponde a 10^{-9} T (Telford et al., 1990).

6.2.1 Momento e Força Magnética

Na magnetometria o princípio físico que envolve a medida do campo magnético da Terra ocorre devido a elementos vetoriais.

Os polos magnéticos são comumente visualizados como excessos de carga magnética que se desenvolvem nas extremidades dos ímãs (carga positiva na extremidade norte e negativa na extremidade sul). Resultados de experimentos eletromagnéticos demonstram que campos magnéticos podem ser observados sempre que correntes elétricas fluem através de condutores, como um cabo elétrico (Kearey et al., 2002). Logo, este pode ser observado juntamente com correntes elétricas que fluem através de condutores. A unidade magnética fundamental é

denominada de momento do dipolo magnético \vec{m} definido conforme equação 1. O sentido de \vec{m} é obtido pela chamada regra da mão direita.

$$\vec{m} = \frac{I a}{c} \vec{n} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

\vec{m} é momento do dipolo magnético;

I é a corrente que flui na espira que limita a área a ;

c é a velocidade da luz;

\vec{n} é o vetor unitário.

Os elementos vetoriais do campo magnético da Terra no qual o método magnetométrico se baseia, fundamenta-se na Lei de Coulomb. A Lei de Coulomb pode ser expressa (equação 2) que uma força (F) que atua entre dois polos magnéticos de intensidade p_1 e p_2 , separados por uma distância (r):

$$F_r = k \frac{p_1 p_2}{r}, \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

k =constante de proporcionalidade magnética (Lowrie, 2007).

6.2.2 Campo Magnético e Indução Magnética

Um corpo é magnetizado por indução quando este está localizado em um campo magnéticos externo, pois seus átomos e moléculas sofrem uma reorientação (alinhamento de spins); (Telford et al., 1990). A indução magnética é o campo resultante da união de um campo externo H , com o campo que foi gerado devido o alinhamento de spins. Há uma relação entre a indução magnética B e o campo externo H que pode ser dado pela equação 3:

$$B = \mu H \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo μ a permeabilidade magnética, em que relacionada com a susceptibilidade do material sendo expressa pela equação 4:

$$\mu = 1 + 4\pi k \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

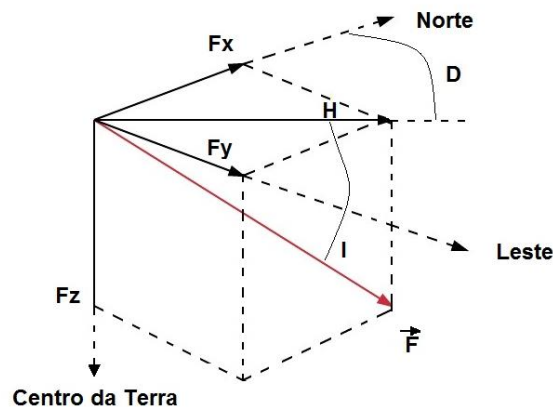
k =constante de proporcionalidade magnética (Lowrie, 2007).

6.2.3 Campo Magnético Terrestre

As fontes que compõe o campo magnético terrestre na superfície da Terra podem ser divididas em três componentes, que são: campo magnético terrestre, procedente do núcleo líquido da Terra; campos magnéticos externos, provenientes das flutuações magnéticas causadas por correntes elétricas produzidas na ionosfera e tempestades solares; e campo magnético anômalo, oriundo da magnetização dos minerais presentes nas rochas (Telford et al., 1990)

Considerando a Terra como uma esfera uniformemente magnetizada, isto equivale à presença de um dipolo magnético no centro da Terra. A intensidade do campo magnético (F) pode ser descrita em termos de componentes ortogonais: a componente horizontal (H), Intensidade Horizontal, a resultante das componentes horizontais e verticais (D), Declinação Magnética, e a componente z (I), Inclinação Magnética. Esses são os elementos do campo geomagnético (Telford et al., 1990), ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Elementos do campo geomagnético.



Fonte: Modificado de Telford *et al.*, (1990)

6.2.4 Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF)

O campo magnético terrestre apresenta uma variação para longos períodos de tempo, tendo os polos uma trajetória irregular sobre a superfície do planeta. Essa variação é prevista pelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). Uma vez que as medidas de magnetometria são influenciadas por três fatores (campo magnético terrestre, magnetização das rochas e campos magnéticos externos), é necessário fazer as correções dessas medidas antes da interpretação dos dados magnetométricos. Para tal, foram removidos a variação magnética diurna e o IGRF (Kearey et al., 2002).

6.2.5 Magnetismo e Susceptibilidade de Rochas e Minerais

Toda rocha com caráter magnético tem uma resposta de acordo com a influência do campo magnético terrestre. Essa resposta classifica as rochas como: diamagnéticas, paramagnéticas, ferromagnéticas, antiferromagnéticas e ferrimagnéticas.

Diamagnéticas – rochas com valores de susceptibilidade negativos e constantes, com característica de orientar seus spins paralelamente ao campo aplicado, mas com orientação contrária a este (Lowrie, 2007).

Paramagnéticas – rochas com valores de susceptibilidade levemente positivos e constantes, com característica de orientar seus spins paralelamente ao campo aplicado e com a mesma orientação a este, mantendo-o enquanto o campo aplicado for mantido (Lowrie, 2007).

Ferromagnéticos - rochas com característica de orientar todos seus spins paralelos entre si. Este fenômeno é muito comum em metais como ferro, níquel e cobalto que possuem seus átomos ocupando posições na estrutura cristalina que possibilita a troca de elétrons com os átomos vizinhos (Lowrie, 2007).

Antiferromagnetismo – rochas com característica de alinhar seus spins paralelamente, mas parte deles em um sentido e a outra parte no sentido oposto. Deste modo, o vetor resultante é zero (Lowrie, 2007).

Ferrimagnetismo – rochas com característica e capacidade de orientar parte de seus spins em sentido contrário a outra parte, mas com intensidades diferentes (Lowrie, 2007).

6.2.6 Magnetização das Rochas

A propriedade magnética total das rochas é dada pela soma das propriedades magnéticas dos minerais magnéticos que influenciam na rocha. Os minerais magnéticos dentro de um tipo de rocha, são dependentes da composição química, da forma de cristalização, além das deformações de sua estrutura (Telford et al., 1990). A susceptibilidade (capacidade que um material tem de ficar magnetizado) é o principal fator que influencia na magnetização de uma rocha, pois o estímulo que se têm dentro da rocha devido a sua composição e demais itens que influenciam na rocha, dominam mais do que a litologia da rocha. Podemos ter os seguintes tipos de magnetizações:

Magnetização Remanescente – Rochas com campo magnético próprio, sem a necessidade da aplicação de um campo externo. Este fenômeno ocorre em materiais ferromagnéticos (Blakely, 1995).

Magnetização Induzida - é a resposta de cargas subatômicas da rocha (prótons e elétrons) em função de um campo externo aplicado (Tauxe, 2005).

Magnetização Viscosa - representa a mudança gradual da polarização de acordo com a variação do campo magnético terrestre, ou seja, é determinada pela longa exposição a um campo externo. Ocorre principalmente em rochas aflorantes de grãos finos (Telford et al., 1990).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Equipamentos

Os gamaespectrômetros são equipamentos que separam a radiação gama em duas ou mais componentes de energia. O cristal de iodeto de sódio é um detector ativado por Tálcio (NaI(Tl)), que ao absorver radiação, transforma esta em pulsos

luminosos. Tais pulsos são transmutados em sinais elétricos proporcionais a intensidade da luz. Em seguida, as medidas em volts são separadas em classes, dependendo da magnitude, de modo a se obter um espectro de energia dos raios gama incidentes (Hansen, 1975).

Um processo de calibração permite que a quantidade da radiação com energias de 1,46 MeV, 1,76 MeV e 2,62 MeV, medida em cintilações por segundo (cps), seja expressa em percentagem (caso do K), ou ppm (caso do U e do Th). Costuma-se usar o termo “canal” para classes estreitas, às vezes com um único valor, e o termo “janela” para classes relativamente largas (Hansen, 1975).

O gamaespectrômetro utilizado no levantamento aéreo foi o Radiation Solutions, modelo RS-500, de 256 canais espectrais (Figura 7), onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação precisa dos fotopicos de Potássio, Urânio e Tório. As radiações gama detectadas são somadas e as leituras reduzidas a uma única saída de 256 canais espectrais. As leituras deste gamaespectrômetro são realizadas a cada segundo, resultando em amostragem a cada de 63 metros (CPRM, 2010).

Figura 7 – Imagem ilustrativa de gamaespectrômetro aéreo, modelo RSX-1.



Fonte: CPRM, 2010.

O magnetômetro é formado por um conjunto de equipamentos usados para medir o momento magnético de uma amostra para um determinado valor de campo aplicado. Os componentes básicos de um magnetômetro são: fonte de corrente, eletroímã, sensor de campo magnético e sistema para movimentação da amostra (Kearey et al., 2002).

O funcionamento básico de um magnetômetro pode ser descrito da seguinte forma: a fonte fornece corrente elétrica para as bobinas do eletroímã que geram um campo magnético na região onde se encontra a amostra. A amostra é magnetizada e, por sua vez, produz um campo induzido que é lido pelo sensor. Através deste campo induzido e de um modelo teórico, obtemos o momento magnético da amostra para cada valor de campo aplicado (Kearey et al., 2002).

O magnetômetro utilizado no levantamento aéreo é do tipo *Vapor de Césio*. Possui um conjunto sensor haste acoplado à cauda da aeronave. Para os levantamentos terrestres realizados neste estudo, um magnetômetro modelo precessão de prótons (*overhauser*), GEM (GSM-19) desenvolvido pela GEM Systems, foi utilizado conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Conjunto magnetômetro modelo GSM - 19 utilizado no levantamento de dados terrestres com o módulo de aquisição de dados (A) e sensor (B).



Fonte: Autora, UNIPAMPA.

7.2 Aquisição de Dados

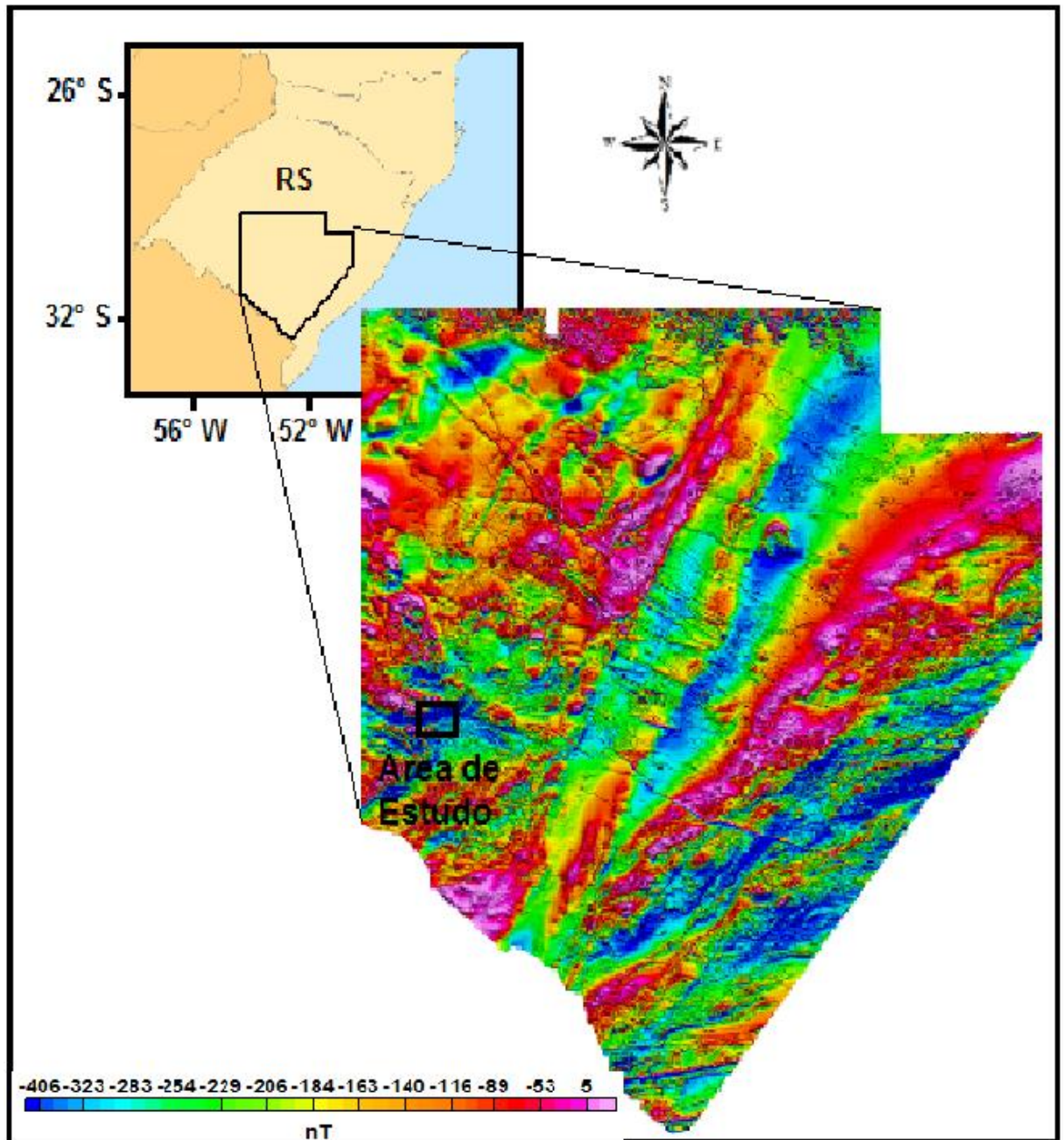
Para o desenvolvimento do trabalho proposto, foi proposta uma integração de dados terrestres, na forma de perfis em escala de semi-detalle associada a dados aéreos. Estes resultados serviram como subsídios no refinamento (maior resolução) e foram integrados aos dados do Projeto Aerogeofísico CPRM concluído em 2010 no Escudo Sul-riograndense (CPRM, 2010).

7.2.1 Levantamento Aéreo - Projeto aerogeofísico CPRM (2010)

Segundo CPRM (2010), as campanhas de aquisição ocorreram entre 20 de fevereiro de a 10 de agosto de 2010. A empresa que executou o projeto foi a LASA Engenharia e Prospecções S/A e as linhas de voo abrangem parte sudeste do estado

do Rio Grande do Sul, totalizando aproximadamente 159.800 km de perfis aéreos (Figura 9).

Figura 9 - Representação do polígono de abrangência do levantamento aerogeofísico da CPRM (2010).



Fonte: Modificado de CPRM (2010).

As linhas de voo tiveram medidas consecutivas com intervalo de 0,1 segundos em um magnetômetro com orientação N-S (direção de voo da aeronave). O espaçamento entre linhas é de 500m. Cordani (2005) defende que estas direções são

ajustadas em regiões de baixas latitudes, pois se aproximam da direção da declinação magnética. A altura de voo do aerolevante foi fixado em 100 metros. O sistema aeromagnético usado no levantamento consistiu em um sensor de vapor de césio acoplado à cauda da aeronave. Essa montagem, tipo stinger, minimiza a interferência do *background* magnético da aeronave (Ramos, 2011).

7.2.2 Aquisição Terrestre

A aquisição terrestre proposta neste estudo foi decidida com base na interação dos grids do levantamento aéreo. Este consiste em aproximadamente 6 perfis de 3 quilômetros de comprimento com o espaçamento de 10 metros entre estações medidas. As direções dos perfis serão definidas seccionando as principais zonas, descontinuidades e litologias de interesse com um espaçamento 200 metros entre elas.

O controle das variações diurnas do campo magnético foi realizado mediante o uso de um magnetômetro terrestre portátil que realizou leituras em intervalos de 3 segundos e uso de um filtro de ruídos de 60Hz (Magnetômetro Base).

7.3 Correções

Correções são necessárias para obtenção dos valores anômalos dos elementos em um levantamento aéreo e terrestre.

7.3.1 Aerogamaespectrometria

Na aerogamaespectrometria os principais fatores que afetam e devem ser corrigidos após um aerolevante são: redução da radiação de fundo atmosférico (*background*), correção do efeito Compton, correção altimétrica, correção do tempo morto e conversão dos dados corrigidos em concentrações (% e ppm) (Ferreira & Souza, 2002).

Na interpretação de dados aerogamaespectrométricos, é importante considerar, além das correções padrão, os efeitos ambientais que podem influenciar aumentando ou diminuindo o espectro de raios gama.

Radiação do *Background* - Minty (1997) defende que radiações que não são originárias do terreno recebem o nome de *background*, uma vez que não podem ter ligação com a geologia local, podendo assim ser removida dos dados coletados em campo. Existem quatro tipos de fontes de radiação do *background*: fluxo atmosférico

do radônio, *background* cósmico, *background* da aeronave e produtos oriundos de explosões atômicas e acidentes nucleares (Ferreira & Souza, 2002).

Gás Radônio - O ^{222}Rn atmosférico e seus produtos, especialmente ^{214}Bi e ^{214}Pb , são os que mais contribuem com o *background*. A mudança de temperatura e de pressão faz com que o ^{222}Rn (gás radônio) escape de solos e fissuras de rochas para atmosfera, devido a ser móvel. Seus filhos, ^{214}Bi e ^{214}Pb , atacam as partículas aéreas de solos (aerossóis) e poeiras, distribuindo-se em função dos movimentos do ar e dos padrões dos ventos. Foote (1969) mostrou que o *background* atmosférico aumenta pela manhã e decresce com o transcorrer do dia, atribuindo-se este comportamento a ação da camada de inversão de temperatura, próxima à superfície terrestre, e sua subsequente estabilização ao entardecer.

Camadas de inversão de temperatura sobre depressões topográficas e lagos frequentemente retêm o Rn no terreno e, sob condições tranquilas, é possível medir diferenças na radioatividade atmosférica em locais distantes entre si por poucos quilômetros (Ferreira & Souza, 2002). As principais medidas para a remoção de *background* do Rn são:

Razão Espectral - onde a intensidade relativa do fotopico da série do urânio é usada para determinar a contribuição ao espectro do U no terreno e do Rn no ar. Este necessita de espectros de multicanais que tenham a correção do tempo morto, calibragem de energia e remoção dos *backgrounds* da aeronave e cósmicos (Ferreira & Souza, 2002).

Detectores *upward-looking* – este requer somente uma janela de dados. Então o espectro de um segundo pode ser integrado sobre as janelas dos quatro canais convencionais depois da calibração da energia, sendo suficientes apenas a calibração e remoção do *background* cósmico e da aeronave nos quatro canais (Minty et al., 1997).

Radiação Cósmica e *Background* da Aeronave - Existem radiações secundárias que são geradas pelas reações do sol com átomos e moléculas na atmosfera, provenientes do sistema solar. Esta radiação interage com a aeronave e com o

detector e produz uma radiação gama conhecida como *background* cósmico (Ferreira & Souza, 2002). Na porção mais baixa da atmosfera esta radiação tem uma distribuição constante de energia, mas decresce em amplitude com o decréscimo da altitude. O *background* da aeronave refere-se à radiação devida a quantidades traços de K, U e Th na aeronave e equipamentos, bem como do próprio detector. Esta componente de *background* é constante (Minty, 1997).

Efeito Compton - Ferreira & Souza (2002) defendem que, em virtude do espalhamento Compton na superfície e no ar, uma energia de 2,62 MeV do ^{208}Tl , pode interferir nas janelas de baixa energia do U e do K. O mesmo ocorre com fontes de U que interferem no espectro de baixa energia do K, assim como na janela de alta energia do Th, em resposta à radiação do ^{214}Bi na série do decaimento do U.

Devido ao pequeno poder de resolução dos detectores de NaI, as contagens decorrentes de uma fonte pura de K podem ser registradas no canal do U. As taxas de contagens nas janelas de baixa energia oriundas de fontes puras de U e Th são conhecidas como *stripping factors* e denominadas α , β e γ , onde: α é igual a taxa das contagens nas janelas de U e Th, a partir de uma fonte pura de Th; β é igual a taxa das contagens nas janelas de K e Th, a partir de uma fonte pura de Th; γ é igual a taxa das contagens nas janelas de K e U, a partir de uma fonte pura de U. Foi introduzido os termos a, b e c para denominar os *stripping factors* inversos. Assim, α é a interferência do U na janela do Th; β é a interferência do K na janela do Th; γ é a interferência do K na janela do U (Ferreira & Souza, 2002).

Estas constantes de calibração são importantes porque permitem transformar as contagens medidas em levantamentos aerogamaespectrométricos em concentrações (% , ppm) (Ferreira & Souza, 2002).

Correção Altimétrica - A correção altimétrica é necessária pois temperatura e a pressão afetam a densidade e, conseqüentemente, as propriedades atenuantes do ar. Para Minty et al. (1997), em topografias planas e alturas que variam entre 50 a 250 metros a equação 5 representa as contagens de cada janela para o intervalo de alturas empregado em levantamentos aerogamaespectrométricos.

$$N = N_0 e^{-\mu^{H-h}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

μ = derivado empiricamente do coeficiente de atenuação de altura para uma dada energia;

N_0 = contagem observada em condições normais de temperatura e pressão a uma altura h ;

N = contagem corrigida para uma altura H .

A altura da equação citada anteriormente pode ser corrigida de acordo com normas da IAEA (1991). A altura equivalente no padrão de temperatura (273,15 K) e pressão (101,325 kPa), ou seja, h em CNTP, é dada pela equação 6.

$$h_{CNTP} = \frac{273,15P h_{obs}}{(T+273,15)+(101,325)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

h_{obs} = altura observada sobre o nível do terreno (metros);

h_{CNTP} = altura equivalente em condições normais de temperatura e pressão - CNTP (metros);

T = temperatura do ar (°C);

P = pressão barométrica (kPa).

Tempo Morto - Durante o tempo que os espectrômetros estão adquirindo dados, o detector deste precisa de um tempo para processar cada pulso recebido. Se um pulso chega ao detector enquanto ele está processando outro pulso, este é imediatamente rejeitado (Minty et al.,1997). Um tempo morto típico é da ordem de 515 μ s/pulso e pode ser corrigido de acordo com a equação 7.

$$N = \frac{n}{(1-t)} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

N = taxa de contagem corrigida (contagem/segundo);

n = taxa de contagem observada (contagem por segundo);

t = tempo morto total (em segundos) para o intervalo de amostragem de um segundo.

O tempo morto pode ser experimentalmente medido pela conexão do espectrômetro a dois detectores idênticos, segundo IAEA (1991). O total da taxa de contagem é, primeiramente, medido com cada detector conectado ao espectrômetro separadamente, e posteriormente com ambos conectados ao espectrômetro. A diferença entre a taxa de contagem medida com ambos os detectores conectados e individualmente resulta numa medida direta do tempo morto do equipamento. A equação que representa o tempo morto por pulso é a equação 8.

$$t = \frac{(2N - Nt)}{Nn_t} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

N = média da taxa de contagem total do detector individual (contagem/segundo);

Nt = total da taxa de contagem medida com ambos os detectores conectados (contagem/segundo);

t = tempo morto por pulso (segundos).

Este procedimento de calibração assume que o total de tempo morto é nT , onde n é o total de contagens registradas.

Conversão para Concentração - Através de voos sobre áreas-teste, onde são conhecidas as concentrações dos radio-elementos, é possível transformar as contagens por segundo em concentrações % e ppm.

Minty et al. (1997) defende que as contagens dos radio-elementos não são dependentes apenas de suas concentrações no terreno, mas também dos equipamentos usados e da altura do levantamento, como já dito anteriormente. Logo, para uma melhor interpretação de dados, as contagens são convertidas para concentração (nível médio de abundância dos radio-elementos). A conversão é feita pela divisão de cada um dos três canais corrigidos pelo coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade de cada janela é calculado pela equação 9.

$$S = \frac{N}{C} \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

N = background médio corrigido e contagem corrigida para a altura nominal do levantamento;

C = concentração média no terreno;

S = coeficiente de sensibilidade.

Efeitos Ambientais - Os fatores ambientais, segundo Ferreira & Souza (2002), que podem influenciar a espectrometria de raios gama são:

- Vegetação – Um terreno coberto por vegetações, troncos de árvores e outros, dependendo do tamanho da cobertura, podem reduzir a radiação emitida em até 35%;
- Temperatura e pressão – Estes fatores afetam diretamente a densidade do ar, afetando então em até 30% a radiação;
- Precipitação – Ferreira & Souza (2002) apontam que a precipitação radioativa de partículas geradas pelos filhos do Rn pode induzir a um aumento de mais de 2000% na concentração de U do terreno;
- Umidade do solo - O aumento da umidade no solo faz a emissão de radiação ser atenuada, na mesma ordem de medida.

Ferreira & Souza (2002) ressaltam que outros fatores podem influenciar nas medidas aerogamaespectrométricas:

- Equilíbrio radioativo – Este influencia nas medidas quando se tem um sistema geoquimicamente fechado, ou seja, tem que ser em um sistema onde se possa determinar o total do pai na série de decaimento apenas sabendo medidas de qualquer filho;
- Geometria e o arranjo das amostras – Detectores portáteis ou aerotransportáveis são considerados de geometria 2π e geometria 4π , ou seja, é aquela na qual a fonte engloba todo o detector afetando, assim, as medidas;
- Volume das amostras – Este é afetado devido à densidade e coeficiente de absorção;

- Soma e o empilhamento de pulsos – Ocorre quando dois raios gama alcançam simultaneamente o detector e são interpretados pelo aparelho como apenas um raio.

7.3.2 Aeromagnetometria e Magnetometria Terrestre

Em ambos os tipos de levantamentos, os fatores que influenciam nas medidas são: variação de IGRF e a variação diurna do campo magnético. A remoção do IGRF normalmente é feita com base na definição da superfície de tendência que expressa o comportamento do campo geomagnético internacional observado na área em estudo (Telford et al, 1990).

A variação diurna normalmente é removida a partir da subtração dos dados obtidos pelo magnetômetro base das leituras do campo magnético efetuadas pelo magnetômetro móvel, tendo como variável de referência a hora em que foi feita a amostragem dos dados. Esta pode ser corrigida através da fórmula (equação 10):

$$MV - MB + Datum \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

MB = Magnetômetro Base;

MV = Magnetômetro Viajante;

Datum = Valor (em nT) do Campo na área e data de aquisição.

8 PROCESSAMENTO DE DADOS

8.1 Validação dos Dados

8.1.1 Dados Aéreos

Os dados encontram-se em formato *grid*, tendo as correções iniciais já previamente efetuadas de acordo com CPRM, (2010). Neste houve uma validação dos dados brutos com ênfase à distribuição dos dados e das linhas de vôo e à presença de *dummys*, efeito pepita (*nugget*), “picos” (*spikes*), ruídos do instrumento e valores negativos.

Toda esta validação auxiliou na determinação do melhor método de interpolação a ser usado. A apuração dos dados incoerentes foi feita em cima dos perfis e do método da quarta diferença (ressalta as altas frequências e substitui os

valores deste ponto retirado, pela diferença entre o segundo ponto anterior, e o segundo ponto posterior) (Blum, 1999).

Além desta validação, as demais correções já explicadas anteriormente em materiais e métodos também foram feitas, sejam elas: redução da radiação de fundo atmosférico (*background*), correção do efeito Compton, correção altimétrica, correção do tempo morto, conversão dos dados corrigidos em concentrações (% e ppm), correção de IGRF e correção de variação diurna.

O método de interpolação utilizado para gerar os grids foi o método da mínima curvatura (Briggs, 1974). Este ajusta uma superfície de curvatura mínima para os pontos de dados. Uma superfície de curvatura mínima é a superfície mais suave possível que se ajustará aos valores de dados brutos. Ocorre uma estimativa com os valores do *grid* para os nós, uma vez que esta estimativa é baseada na distância média inversa dos dados.

8.1.2 Dados Terrestres

A validação dos dados brutos também ocorreu no levantamento terrestre, onde se verificou e corrigiu presença de *dummys*, efeito pepita (*nugget*), “picos” (*spikes*), ruídos do instrumento e valores negativos.

A correção dos dados incoerentes foi feita em cima dos perfis e do método da quarta diferença (ressalta as altas frequências e substitui os valores deste ponto retirado pela diferença entre o segundo ponto anterior e o segundo ponto posterior) (Blum, 1999).

Para geração do *grid* e respectivos mapas de contorno sombreado das anomalias geofísicas, o método da mínima curvatura para interpolação foi utilizado segundo Briggs (1974). O tamanho de células utilizado foi de 50X50 metros (valor correspondente a $\frac{1}{4}$ da distância entre as linhas).

8.2 Filtragem dos Dados e Mapas Geofísicos

8.2.1 Aerogamaespectrometria

A interpretação dos dados gamaespectrométricos é orientada de acordo com o objetivo de análise e interpretação. Depende diretamente da informação e feições a serem destacadas. Diferentes mapas são gerados por meio dos *softwares* apropriados, a fim de que a melhor integração possa ser obtida.

Seções geológicas ao longo das feições de interesse associadas aos dados geofísicos constituem uma importante ferramenta de visualização e interpretação. No método gamaespectrométrico adota-se os seguintes tipos de mapas:

Mapas Individuais e Contagem Total (CT) - Os primeiros mapas gerados a partir dos dados já corrigidos mostram apenas a distribuição espacial das contagens de cada um dos elementos radiométricos (K, Th e U) assim como a distribuição da Contagem Total (CT – somatória de todas as contagens dentro da janela de energias 0,41-2,81 MeV) (Ferreira & Souza, 2002).

Razões - O mapas de razões são gerados a partir dos primeiros mapas (contagens individuais dos radioelementos), onde temos as seguintes razões: $\frac{eU}{eTh}$, $\frac{eTh}{eK}$, $\frac{eU}{eK}$. Estes mapas são utilizados principalmente para evidenciar diferenças entre os canais em corpos graníticos. A variação de concentração é resultado principalmente da geologia local (predomínio de um ou outro tipo geoquímico de granitóide) e pelo grau de intemperismo sofrido. A diferença nos teores dos radioelementos fica evidente principalmente nos mapas de razão $\frac{eU}{eK}$ e $\frac{eTh}{eK}$, enquanto que o mapa de razão $\frac{eU}{eTh}$ apresenta contraste menos significativo (Ferreira & Souza, 2002).

Fator F - É possível também analisar a razão entre os elementos radiométricos a partir do parâmetro F (Ferreira & Souza, 2002), já descrito anteriormente, uma vez que seu mapa realça o enriquecimento de Potássio e Urânio em relação ao Tório. Os valores do fator F vão ser baixos em áreas com forte intemperismo e alta lixiviação do potássio e altos valores para ambientes maciços rochosos que foram submetidos ao enriquecimento de potássio e urânio por alteração.

Mapa Ternário - O mapa ternário é um mapa que associa diferentes cores a diferentes radioelementos. Existem dois tipos de coloração onde a RGB é um padrão que associa as cores vermelho, verde e azul (Red, Green, Blue) ao Potássio (em %), Tório e Urânio (em ppm) respectivamente. O padrão CMY, por sua vez, considera as cores ciano, magenta e amarelo (Cyan, Magenta, Yellow) como base para composição do mapa. A legenda do mapa é colocado de acordo com um triângulo equilátero, onde cada vértice está associado a uma cor, logo a um elemento. A cor branca representa

altas contagens dos três elementos, enquanto que a cor preta é associada às baixas contagens dos mesmos. Assim como os mapas de razões, o mapa ternário é utilizado para ressaltar contrastes entre áreas com diferentes concentrações dos três elementos que podem não estar tão evidentes nos primeiros mapas, facilitando assim a interpretação dos dados (Ferreira & Souza, 2002).

8.2.2 Aeromagnetometria e Magnetometria Terrestre

A interpretação dos dados magnetométricos também é orientada de acordo com o objetivo de análise e interpretação. Depende diretamente das feições, lineamentos e componentes rasas ou profundas a serem destacadas. Diferentes mapas são gerados por meio dos *softwares* apropriados, a fim de que a melhor interpretação possa ser obtida.

A integração de dados geológicos e geofísicos auxilia na visualização e interpretação. No método magnetométrico, adota-se os seguintes tipos de mapas:

Mapa de Campo Magnético Anômalo Total (CMA) - O campo magnético anômalo representa as anomalias magnéticas situadas na superfície e na sub-superfície. É obtido pela remoção do campo magnético terrestre do campo magnético total medido no levantamento. A resposta magnética observada no campo magnético anômalo pode ser de natureza tanto profunda, quanto de natureza rasa. O mapa do campo magnético anômalo (CMA) apresenta as anomalias com padrão dipolar. Este caráter dificulta sua interpretação e faz com que os produtos derivados sejam mais adequados (Blakely, 1995).

Mapa das Anomalias Regionais e Residuais - Para a separação das componentes regional e residual foi aplicado um filtro gaussiano, que funciona como uma passa-banda. Porém, os dados de saída apresentam uma distribuição gaussiana (normal) e o ponto de corte escolhido é o desvio padrão da função gaussiana (Oliveira, 2008). Antes da aplicação desse filtro, após o pré-processamento, foi gerado o espectro de potência radial médio dos dados. A sua análise permitiu a escolha dos intervalos de número de ondas adequados para a separação das componentes em rasas e profundas. Esse número de onda corresponde a um ponto onde a curva do espectro, aproximada por retas, corresponde à junção da reta, cujos parâmetros (inclinação e intercepto) correspondem às componentes espectrais.

Mapa de Anomalias Reduzidos ao Polo/Redução ao Polo (RTP) - O método de redução ao polo (Baranov, 1957) é utilizado em áreas de altas e médias latitudes, recalculando a intensidade dos dados como se os dados estivessem localizados no polo, onde a magnetização induzida é vertical, com o objetivo de tornar independente da direção da indução do campo geomagnético (Telford et al., 1990). A redução ao polo geralmente ajuda na interpretação, pois transforma uma anomalia de caráter dipolar em uma anomalia monopolar. Este filtro desloca o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador. Este filtro, quando aplicado aos dados, não produz bons resultados onde a magnetização não é induzida pelo campo magnético atual, a não ser que se conheça a atitude da magnetização remanescente.

Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) dos Valores Magnéticos Anômalos

- O sinal analítico é formado por uma combinação de gradientes horizontais e verticais de uma anomalia magnética. Segundo Nabighian (1972), uma importante característica do sinal analítico é que ele independe da direção de magnetização da fonte. A amplitude do sinal analítico está simplesmente relacionada com a amplitude de magnetização. Nabighian (1972) também mostraram que o sinal analítico direciona para os limites do corpo magnético. A imagem do sinal analítico determina parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais), profundidade dos corpos, com o realce dessas estruturas (anomalias). As amplitudes do sinal analítico apresentam como sua principal característica o posicionamento das anomalias magnéticas resultantes imediatamente acima dos limites da estrutura.

Mapa da Derivada Vertical (DV) dos Valores Magnéticos Anômalos

- O filtro da derivada vertical é aplicado nos dados de campo potenciais para realçar as fontes geológicas rasas. O filtro consiste da derivada da anomalia em relação à direção vertical, onde A é amplitude da anomalia (Blakely, 1995). Este utiliza a equação 11.

$$D_z = \frac{\partial A}{\partial z} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

∂A = derivada da amplitude da anomalia;

∂z = derivada da direção vertical.

Aplicação da Transformada de Fourier - A filtragem é uma operação matemática que procura ressaltar ou atenuar feições de interesse, suprimindo as de caráter indesejável ou ruidosas. Antes da aplicação da transformada de Fourier é necessário a criação de um *grid* inicial, de maneira que atenda às seguintes propriedades: seja quadrado, tenha dimensões aceitáveis ao procedimento da transformada de Fourier e não possua amostragens irreais (*dummies*) (Geosoft, 2010). A transformada rápida de Fourier é um método que decompõe o sinal dentro de uma série de funções senos e cossenos de diferentes frequências. Esta pode ser calculada rapidamente em computadores, com a utilização de algoritmos baseados nesta transformada, sendo o mais conhecido denominado de transformada rápida de Fourier, em inglês *Fast Fourier Transform* - FFT.

Mapa de Continuação para Cima - O filtro de continuação para cima transforma as medidas do campo potencial referentes a uma superfície para o campo que pode ser medido a partir da superfície distante de todas as fontes. Essas transformações atenuam as anomalias de acordo com a frequência, ou seja, quanto menor a frequência, melhor a atenuação (Blakely, 1995). Este também pode ser considerado um filtro de limpeza porque quase não produz efeitos de borda. Assim, é muitas vezes usado para remover ou minimizar os efeitos de fontes rasas e ruídos em *grids* (Geosoft, 2010).

Passa Baixa, Passa Banda e Passa Alta - Todos, funcionam com o mesmo princípio, mas em limites de corte contrários. Sua função principal é evitar o falseamento (*aliasing*), que é a interferência de amplitudes de anomalias com comprimento de onda menor ou maior que o dobro da dimensão da célula (frequência de corte definido pela frequência de Nyquist) (Geosoft, 2010).

Derivadas Direcionais - Os filtros direcionais são capazes de realçar ou remover feições lineares. A derivada em X destaca as anomalias de direção leste-oeste. A derivada em Y realça as anomalias de direção Norte-sul e a derivada em Z as

anomalias de fontes mais rasas, eliminando as feições de fontes mais profundas (CPRM, 2010).

Espectro de Potência Radial - O espectro de potência radial é um método que oferece a possibilidade da melhor determinação das frequências de corte (altas e baixas) em função do filtro escolhido. Esta análise realiza-se no domínio da frequência (Bongiolo, 2011).

O espectro de potência radial é criado através de uma malha, onde se evidencia energia relativa ao número de onda e a sua direção, por meio de uma função bidimensional. O cálculo do espectro radial tem como resultado um gráfico que contém o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y (Bongiolo, 2011).

Spector e Grant (1970), criou a equação 12, afim de correlacionar o espectro de energia de anomalias e a profundidade média dos corpos:

$$(E(k)) = 4\pi M^2(e^{-2hk})(1 - e^{-tk})(S^2(k)) \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$E(k)$ = energia do sinal;

M = momento magnético;

h = profundidade estatística do topo das fontes;

k = número de onda radial;

t = altura do corpo causador da fonte;

$S(k)$ = comprimento horizontal do corpo.

Ao comparar o fator de profundidade (e^{-2hk}), com o fator horizontal ($S^2(k)$) e com o fator de extensão do corpo ($1 - e^{-tk}$), Spector e Grant (1970) concluíram que o fator de profundidade do topo das fontes domina o espectro, principalmente em bandas de baixa frequência. Dessa maneira, o espectro de energia pode ser simplificado conforme as equações 13 e 14 respectivamente:

$$E(r) \approx Ae^{-2hk} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\ln(E(r)) \approx -2hk + A' \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

A e A' = coeficientes constantes;

h = profundidade média do topo do corpo fonte;

k = número de onda radial.

A análise do espectro radial pode ser utilizada como estimativas na determinação de profundidade de fontes, separando-as através de seu espectro em fontes rasas, profundas e intermediárias (Bongiolo, 2011).

Deconvolução de Euler- As profundidades aparentes para as fontes magnéticas são derivadas a partir da Equação Homogênea de Euler (Deconvolução de Euler). Este processo relaciona o campo magnético e os componentes dos seus gradientes às localizações das fontes de uma anomalia, com o grau de homogeneidade expresso como um “índice estrutural”. O índice estrutural é uma medida da razão “da queda” do campo com a distância da fonte. A relação homogênea de Euler para dados magnéticos pode, ser escrita na forma da equação 15.

$$(x - x_0) \frac{\delta T}{\delta x} + (y - y_0) \frac{\delta T}{\delta y} + (z - z_0) \frac{\delta T}{\delta z} = N(B - T) \quad (\text{Eq.15})$$

Onde:

x_0, y_0, z_0 é a posição da fonte magnética cuja campo total (T) é detectado para a posição (x, y e z);

B é o campo magnético regional;

N é a medida da razão da queda do campo magnético e pode ser interpretada como o Índice Estrutural.

O processo da Deconvolução de Euler é aplicado para cada solução. O método envolve o estabelecimento de um valor apropriado para o índice estrutural e o uso da inversão pelo método dos mínimos quadrados para resolver a equação para valores das localizações x_0, y_0 e z_0 , além do valor de B. O tamanho de uma janela quadrada também deve ser especificado. Esta janela consiste de um número de células nos conjuntos de dados *gridados* para utilizar na inversão para cada localização de uma solução selecionada. A janela é centralizada em cada uma das localizações das

soluções. Todos os pontos na janela são utilizados para resolver a Equação de Euler para as soluções de profundidades, inversamente ponderadas pela distância a partir do centro da janela. A janela deve ser “larga” o suficiente para incluir cada solução de anomalia de campo potencial de interesse no *grid* do campo magnético total, mas idealmente não grande demais a ponto de incluir quaisquer anomalias adjacentes que não sejam de interesse.

8.3 Modelagem Magnetométrica

A modelagem magnetométrica é uma técnica geofísica importante para determinação de geometrias e profundidade de anomalias com contrastes de densidades relevantes.

8.3.1 Modelagem inversa

Na modelagem inversa o processo de geração do modelo é automatizado e realizado por meio de um algoritmo computacional, consiste em pouca ou nenhuma interação do interprete. Há diversas metodologias de modelagem inversa, o método utilizado está presente no *VOXI Earth Modelling*, que é um serviço de *software* geofísico que gera modelos de *voxel* em 3D a partir de dos dados magnéticos e gravimétricos, aéreos e terrestres. O *VOXI Earth Modelling* usa o poder da computação na nuvem para criar rapidamente modelos em 3D de grandes conjuntos de dados de exploração (Geosoft, 2010).

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

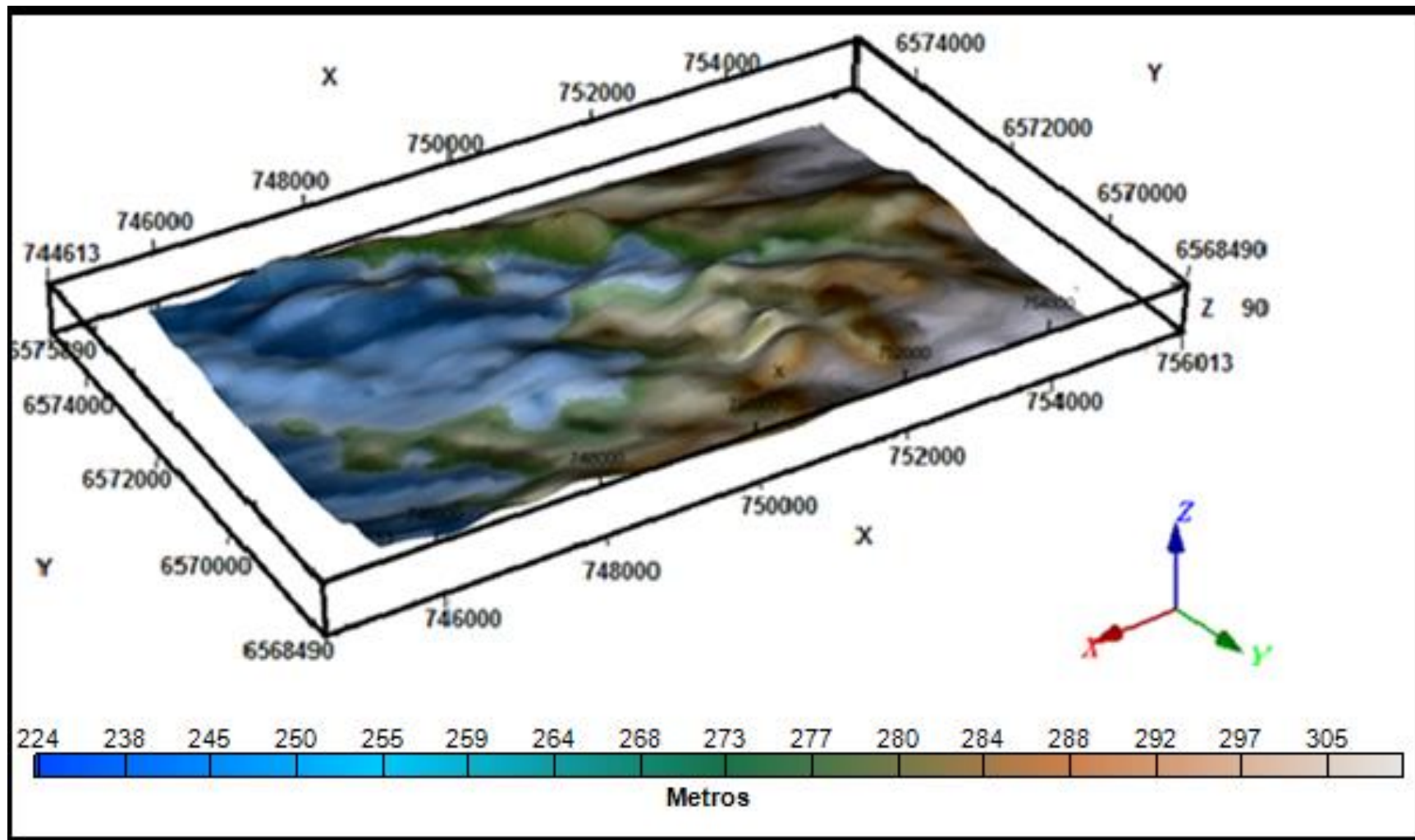
9.1 Mapas geofísicos - Aerogamaespectrometria

Com o objetivo de identificar a melhor localização para levantamento terrestre, caracterizar a área, mapear morfologias de acordo com a dispersão de elementos e de minerais, separar diferentes litologias ou contatos entre rochas, foram gerados diferentes mapas geofísicos no Software *Oasis MontajTM*, integrados a lineamentos geológicos.

9.1.1 Modelo Digital de Terreno - MDT

Para melhor compreensão do espaço que o levantamento aéreo abrangeu, foi gerado o Modelo Digital de Terreno (MDT) (Figura 10), com mapa de pseudo-iluminação e relevo. Logo, observa-se um alto topográfico com variação altimétrica de aproximadamente 90 metros.

Figura 10 – Modelo Digital de Terreno de Dados Aéreos (MDT).



Fonte: Produzido pela Autor.

9.1.2 Contagem de Urânio (ppm)

A área de estudo tem como parte encaixante o CGSMC, que é composto por gnaisses quartzo-feldspáticos (tonalitos e trondjemitos), gnaisses máficos, anortositos e ultramafitos (Hartmann et al., 2000). Esta parte encaixante é intrudida pelo Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier* e pela Suíte Granítica Campinas, que são compostas por sienos e monzogranitos, dacitos e riodacitos porfiríticos e granodioritos.

Tanto o urânio, quanto o tório estão comumente presentes em minerais acessórios, de rochas metamórficas quartzo-feldspáticas (Boyle, 1982). Os minérios de Urânio estão presentes em pegmatitos, sienitos e gnaisses (Gunn & Dendith, 1997), justificando os altos valores de urânio no mapa de Contagem de Urânio (Figura 11) a seguir, nas áreas a nordeste (A) e sudoeste (B), onde propõe-se ter as rochas encaixantes, representadas pelo CGSMC.

9.1.3 Contagem de Tório (ppm)

No mapa de Contagem de Tório (Figura 12), observa-se altos valores do elemento tório também a nordeste (A) e sudoeste (B). Lembrando que o Tório está presente em metamórficas quartzo-feldspáticas, associando-se ao CGSMC.

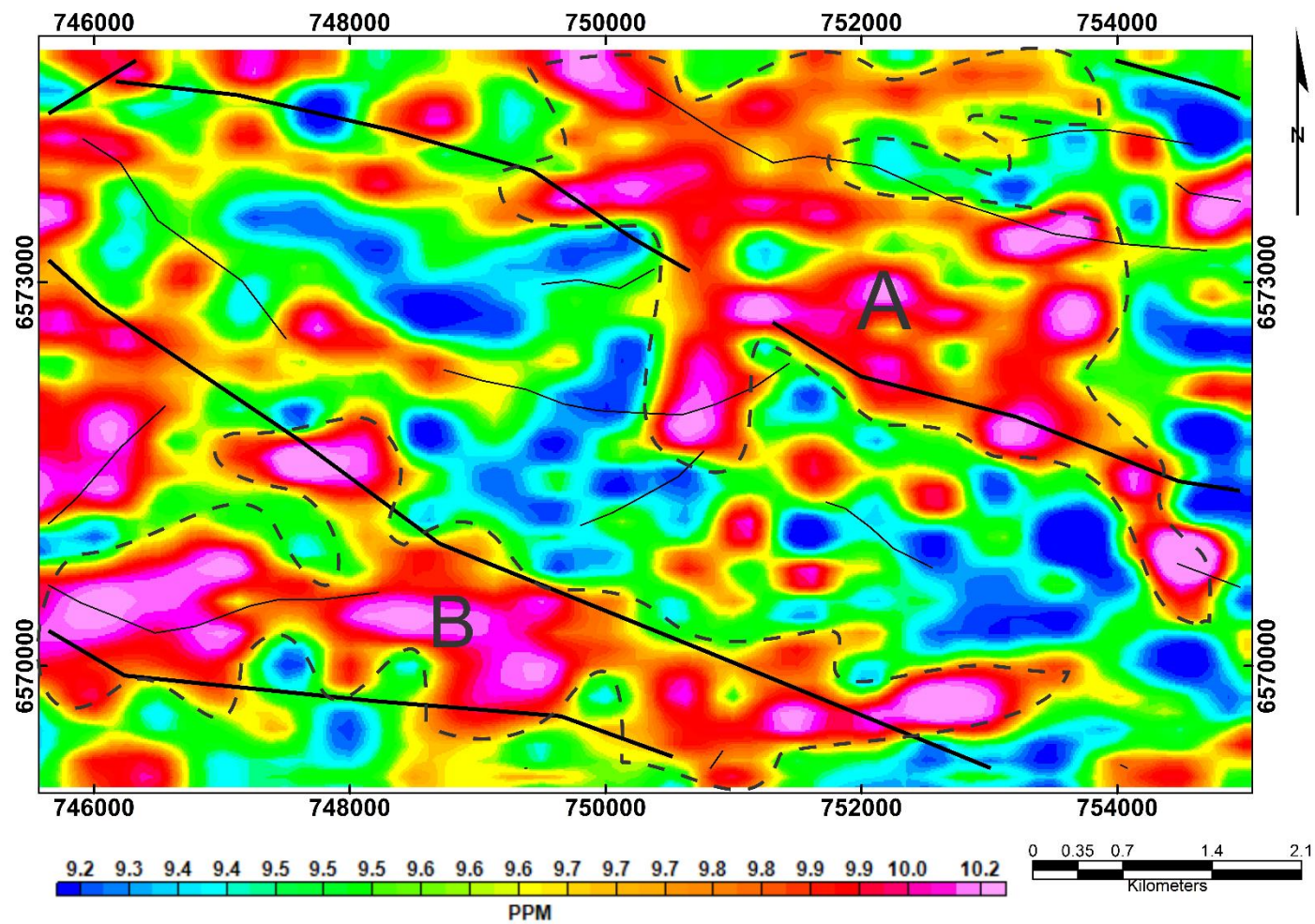
9.1.4 Contagem de Potássio (%)

As rochas que apresentam maior teor de Potássio são rochas metamórficas micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas, como filitos, xistos e gnaisses. No mapa de Contagem de Potássio (Figura 13), nota-se também altos valores do elemento potássio a nordeste (A) e sudoeste (B), sugerindo a presença de rochas do CGSMC.

9.1.5 Contagem Total (ppm)

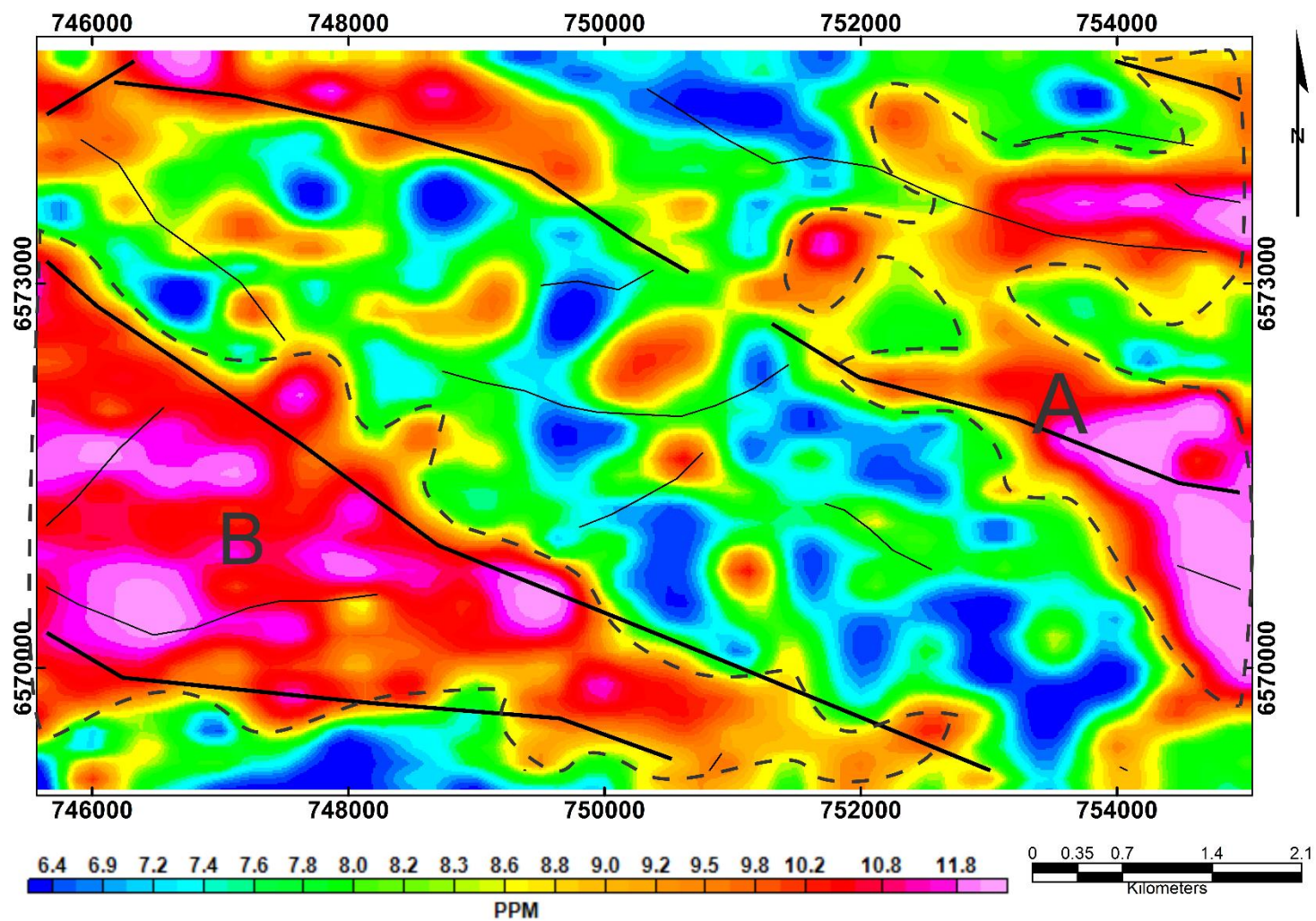
O mapa de Contagem Total (Figura 14), evidencia a somatória de todas as contagens de elementos individuais dentro da janela de energias 0,41-2,81 MeV. Observa-se neste mapa que os altos valores dos três elementos se localizam a nordeste (A) e sudoeste (B) da área, onde associa-se a parte encaixante ao CGSMC, pois Dickson & Scott (1997) sobre teor médio dos radioelementos nas rochas ígneas mostrou que há uma tendência de aumento da quantidade destes em função do teor de sílica, ou seja, rochas félsicas possuem um teor mais elevado de radioelementos do que rochas máficas ou ultrabásicas, justificando o alto valor de CT nas áreas que sugere-se ser o CGSMC.

Figura 11 – Mapa com os dados de contagem de Urânio (ppm) e lineamentos.



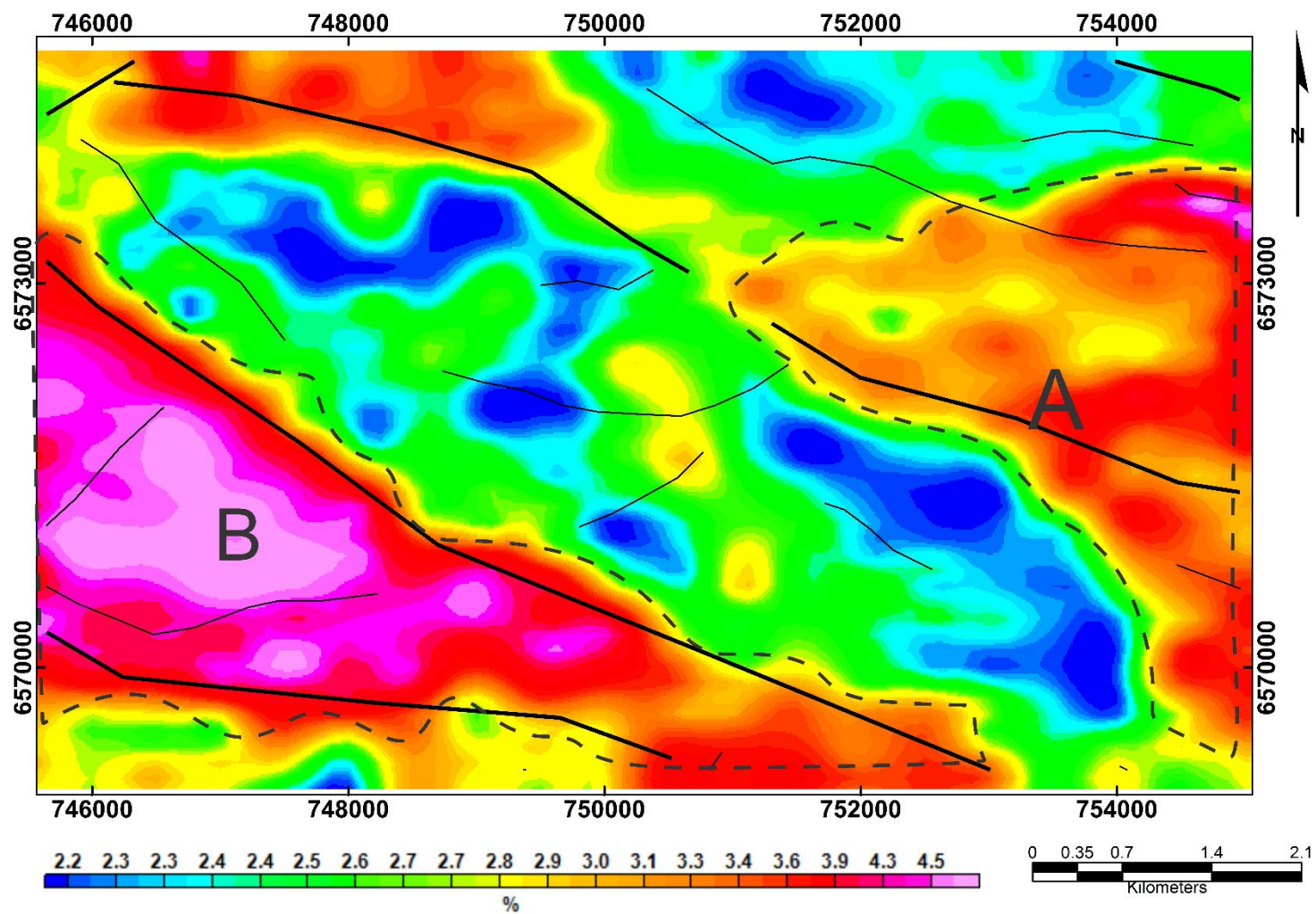
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 12 – Mapa com os dados de contagem de Tório (ppm) e lineamentos.



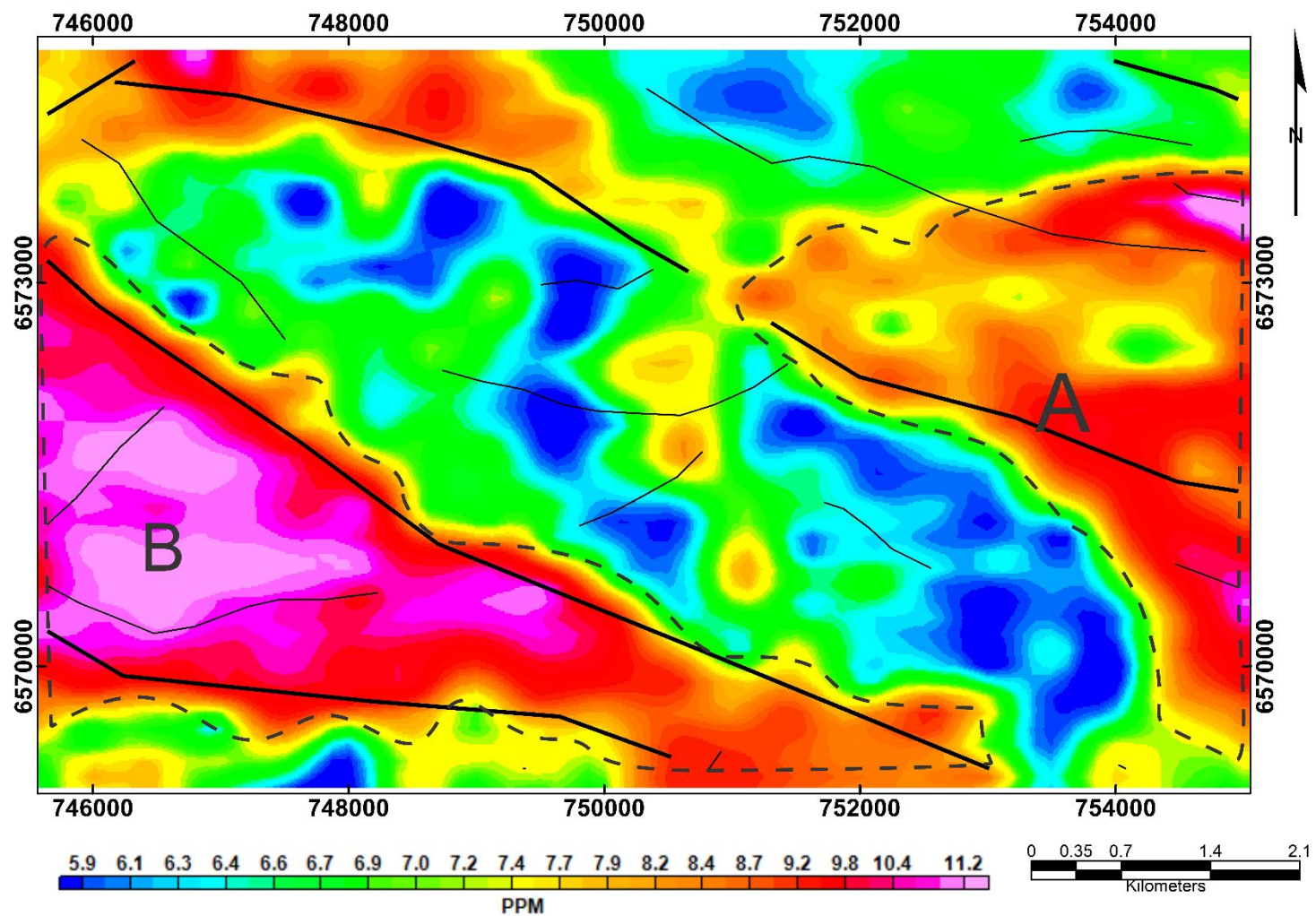
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 13 – Mapa com os dados de contagem de Potássio (%) e lineamentos.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 14 – Mapa de Contagem Total (ppm) e lineamentos.



Fonte: Produzido pela Autora

9.1.6 Razão U/Th (ppm)

Segundo Dickson & Scott (1997), o Tório geralmente apresenta um crescimento maior do número de contagens em função do teor de sílica comparativamente ao Urânio, o que torna possível utilizar a razão entre esses elementos $\frac{U}{Th}$ para investigar o grau de diferenciação dentro de uma suíte ígnea. No Mapa de Razão $\frac{U}{Th}$ (Figura 15) observa-se um alto de valores centralizado (A) ao mapa, que pode ser associado a intrusões da Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier* e Suíte Granítica Campinas.

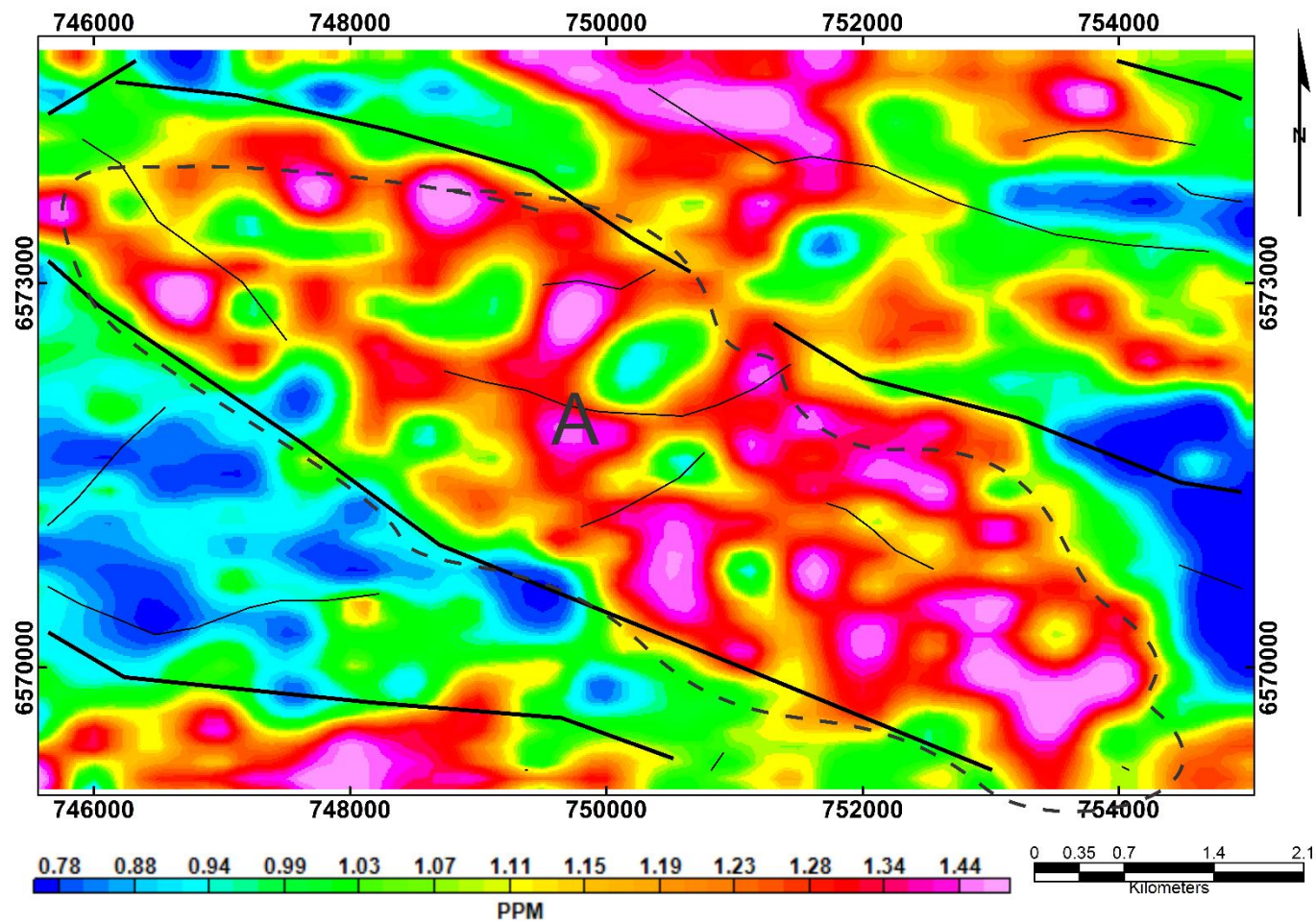
9.1.7 Razão U/K (ppm)

Os mapas de razão em geral são utilizados para destacar a diferença observada entre as concentrações dos elementos em corpos graníticos em uma mesma região, pois corpos graníticos diferenciados podem apresentar concentrações distintas dos elementos radiométricos (K, Th e U), visto que eles não apresentam comportamento geoquímico uniforme durante a granitogênese, embora para corpos de uma mesma região possam estar correlacionados (Dickson & Scott, 1997).

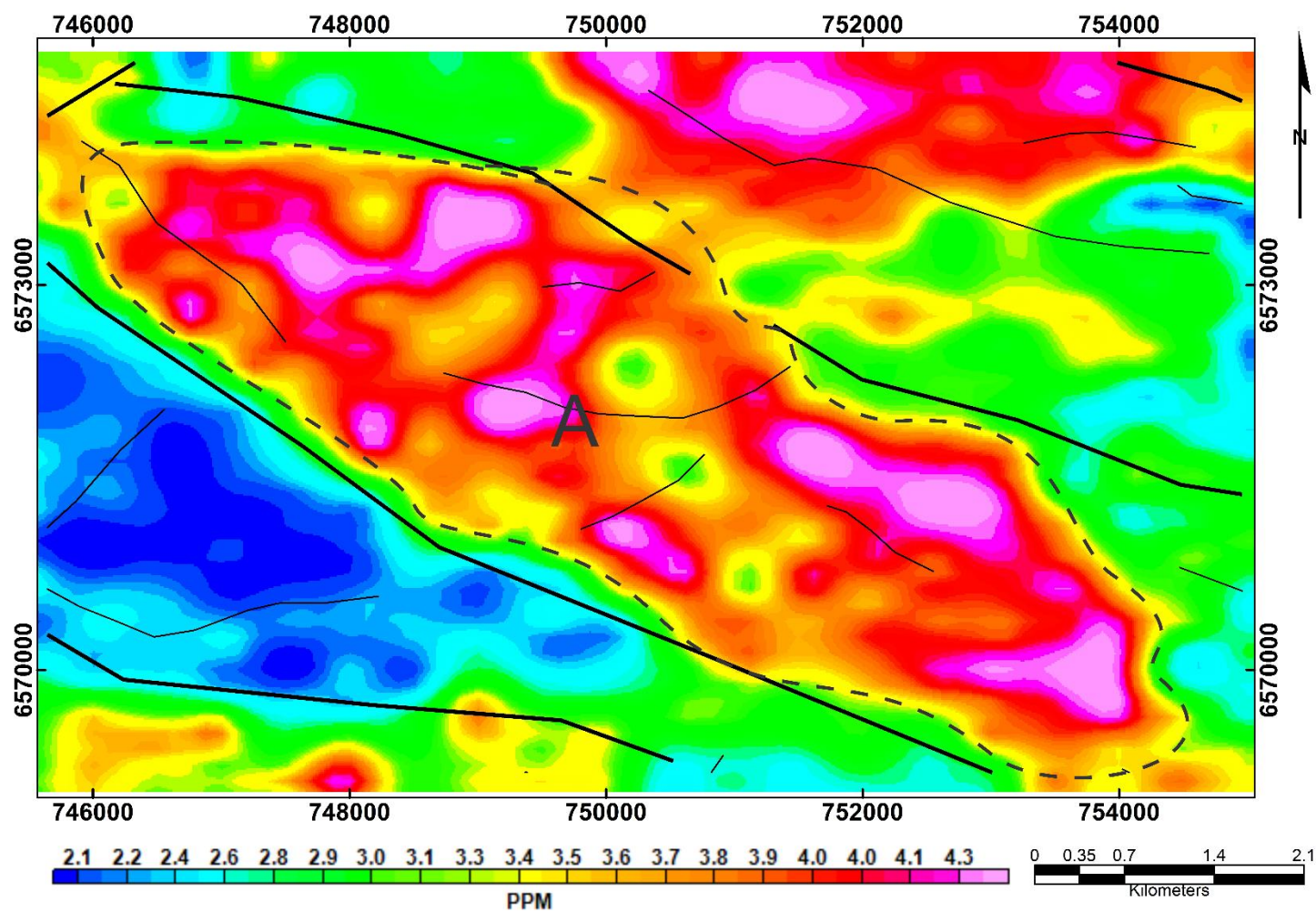
O Mapa de Razão $\frac{U}{K}$ evidencia variação de concentração entre esses elementos. Este auxilia a encontrarmos resultados principalmente da geologia local, pois evidencia o predomínio de um ou outro tipo geoquímico de granitóide devido à alta concentração de um elemento em relação a outro (Dickson & Scott, 1997). No Mapa de Razão $\frac{U}{K}$ (Figura 16), observa-se altos valores na parte central (A) do mapa, podendo assim marcar as Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier* e Suíte Granítica Campinas.

9.1.8 Razão Th/K (ppm)

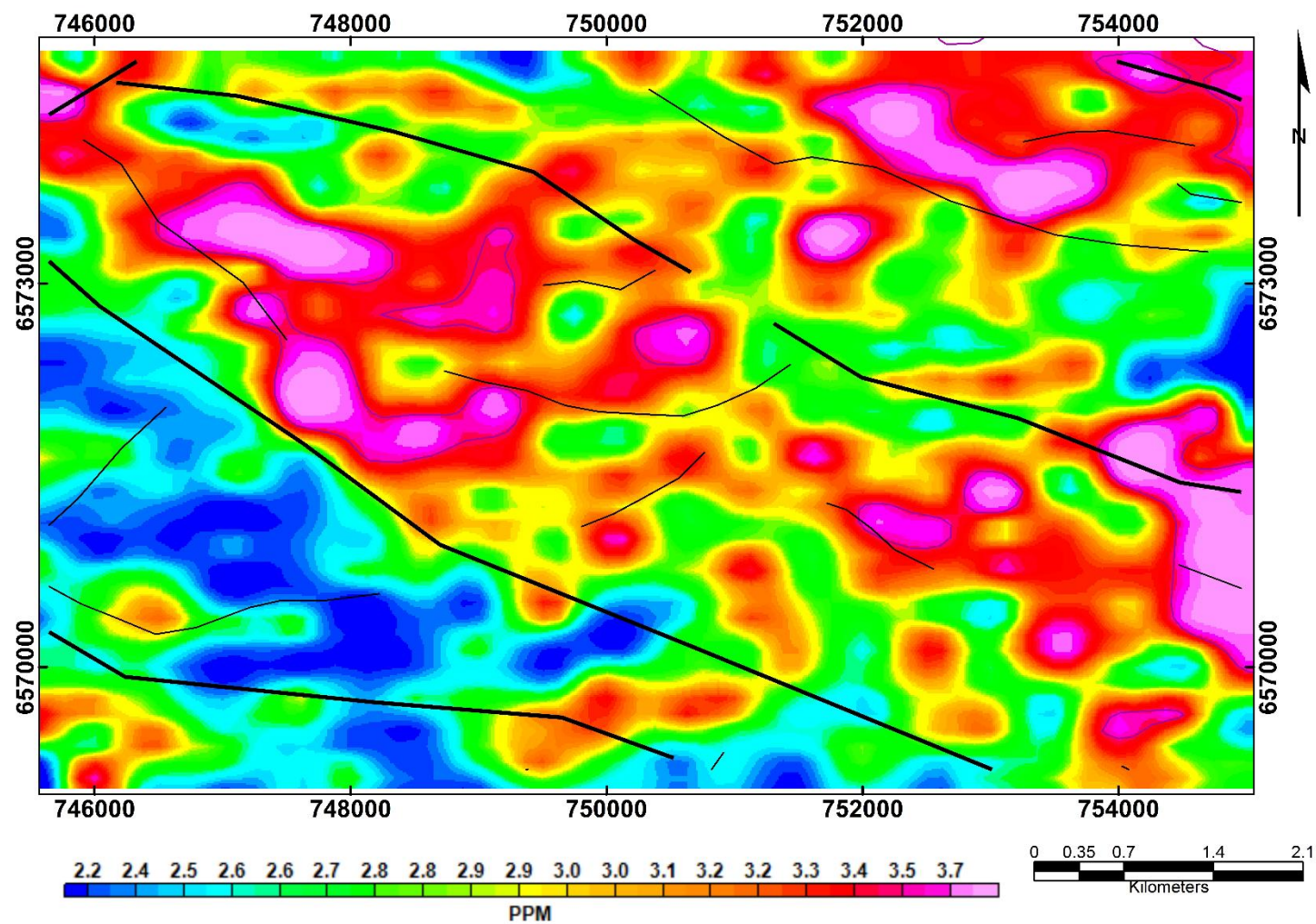
O Mapa de Razão $\frac{Th}{K}$ evidencia variação de concentração entre esses elementos. Este auxilia também a encontrarmos predomínio de um ou outro tipo geoquímico de granitóide devido à alta concentração de um elemento em relação a outro (Dickson & Scott, 1997). No mapa (Figura 17) está destacado os pontos de altos valores, que sugerem ser os pontos de intrusão das Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier* e Suíte Granítica Campinas

Figura 15 – Mapa de Razão $\frac{U}{Th}$ e lineamentos.

Fonte: Produzido pela Autora

Figura 16 – Mapa de Razão $\frac{U}{K}$ e lineamentos.

Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 17 – Mapa de Razão $\frac{Th}{K}$ e lineamentos.

Fonte: Produzido pela Autora.

9.1.9 Parâmetro F

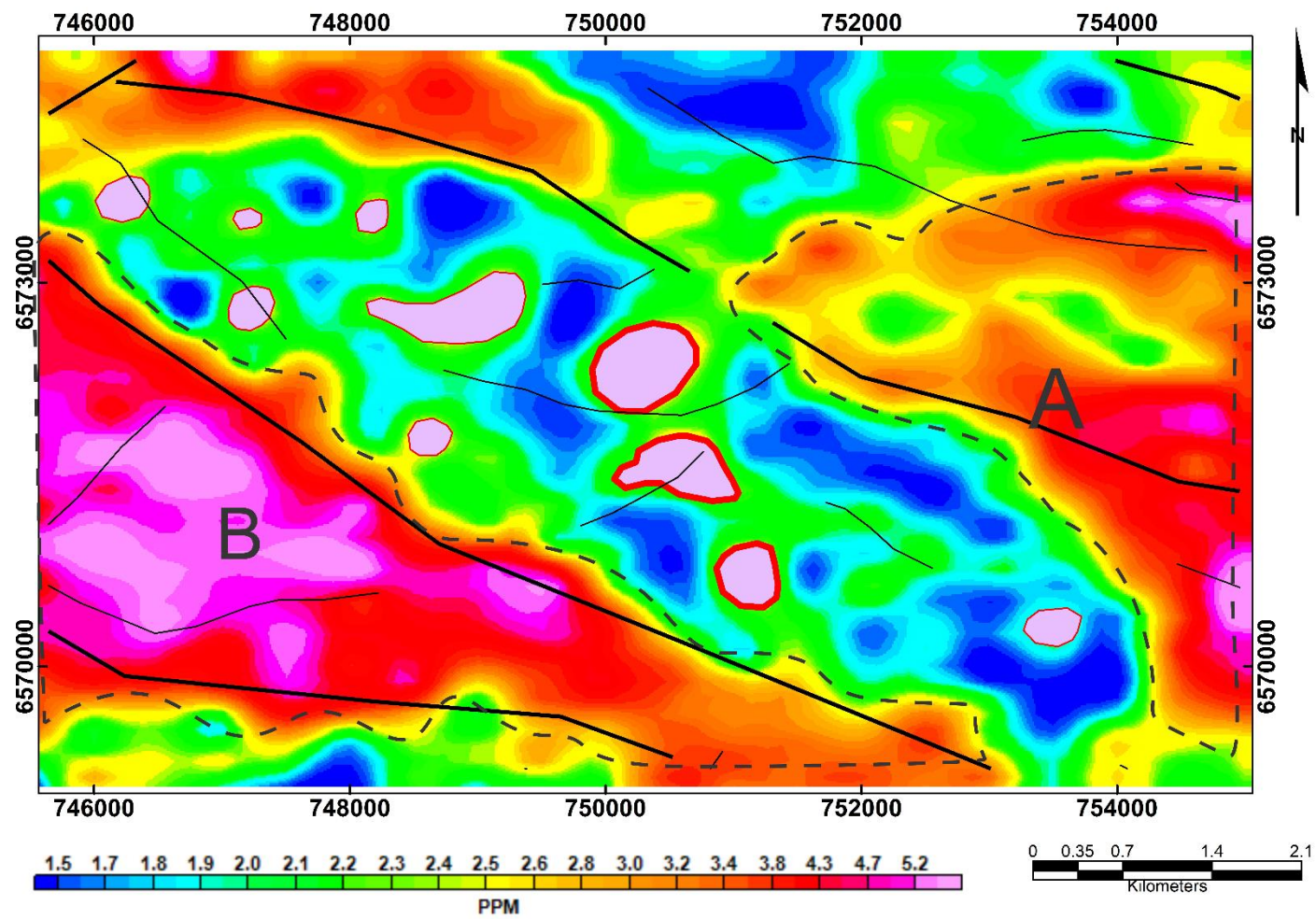
O mapa do Parâmetro F realça o enriquecimento de Potássio e Urânio em relação ao Tório (Dickson & Scott, 1997). O Mapa de parâmetro F mostra as áreas nordeste (A) e sudoeste (B), já discutidas anteriormente e tendo como sugestão associação ao CGSMC. Mas a área a iniciarmos discussão seriam as de alto valores ao centro do mapa (Figura 18), pois é necessário associa-las à alguma litologia.

9.1.10 Ternário

O mapa ternário é utilizado para ressaltar contrastes entre áreas com diferentes concentrações dos três elementos, facilitando assim a interpretação dos dados (Dickson & Scott, 1997). Observa-se no Mapa Ternário (Figura 19) que a áreas que foram evidenciadas no mapa de parâmetro F estão na cor verde para o amarelo, o que pode ser interpretada como um pequeno alto de Potássio, mas principalmente alto de Tório.

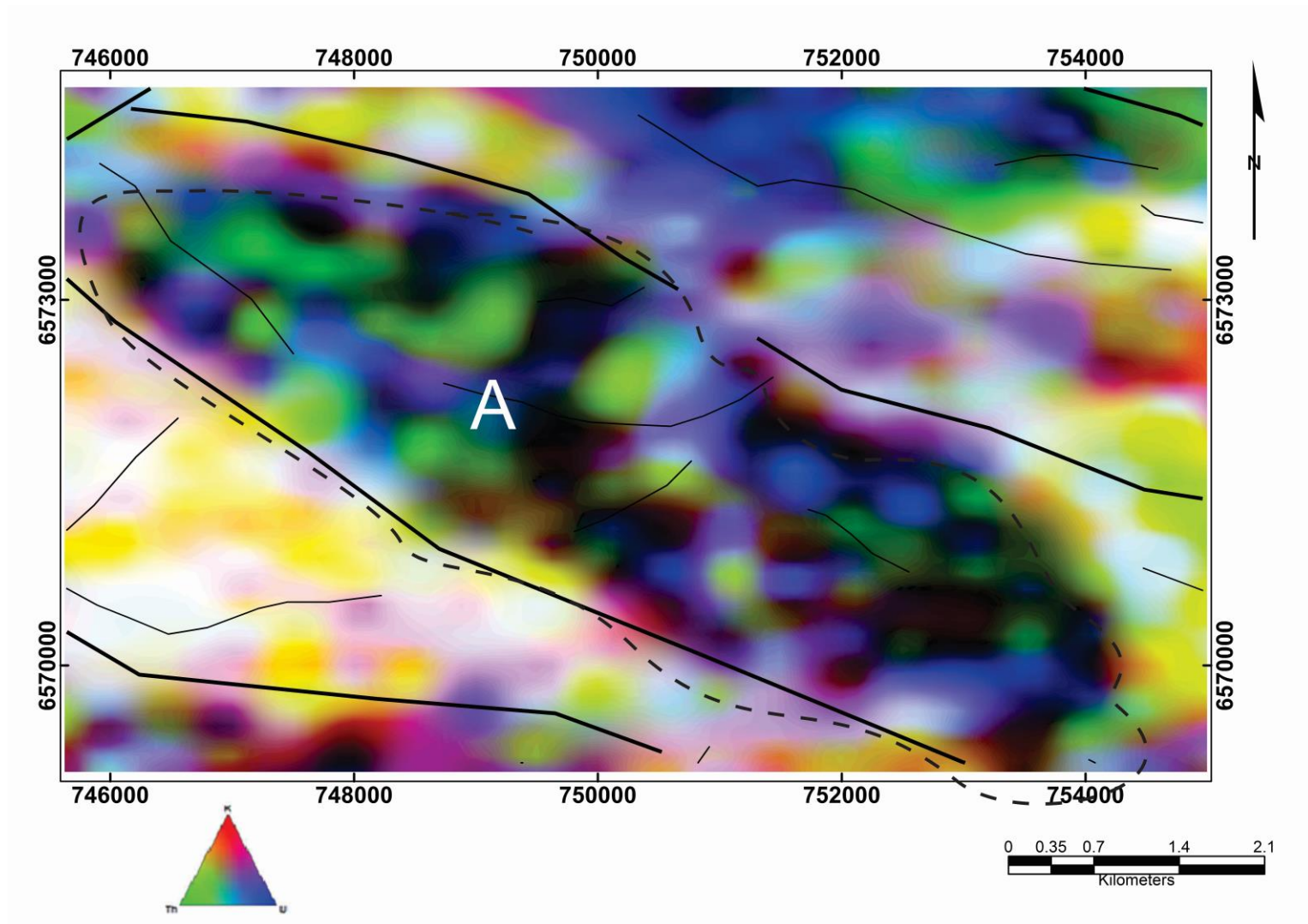
Afim de esclarecer dúvidas sobre as litologias que compõe as partes centrais do área de estudo, inicialmente é proposto uma magnetometria terrestre a fim de detalhar a área de estudo. A localização das linhas é proposta no próximo mapa (Figura 20), mas será confirmada após análise de mapas aeromagnetométrico

Figura 18 – Mapa de parâmetro F e lineamentos, com área de alto valor em destaque.



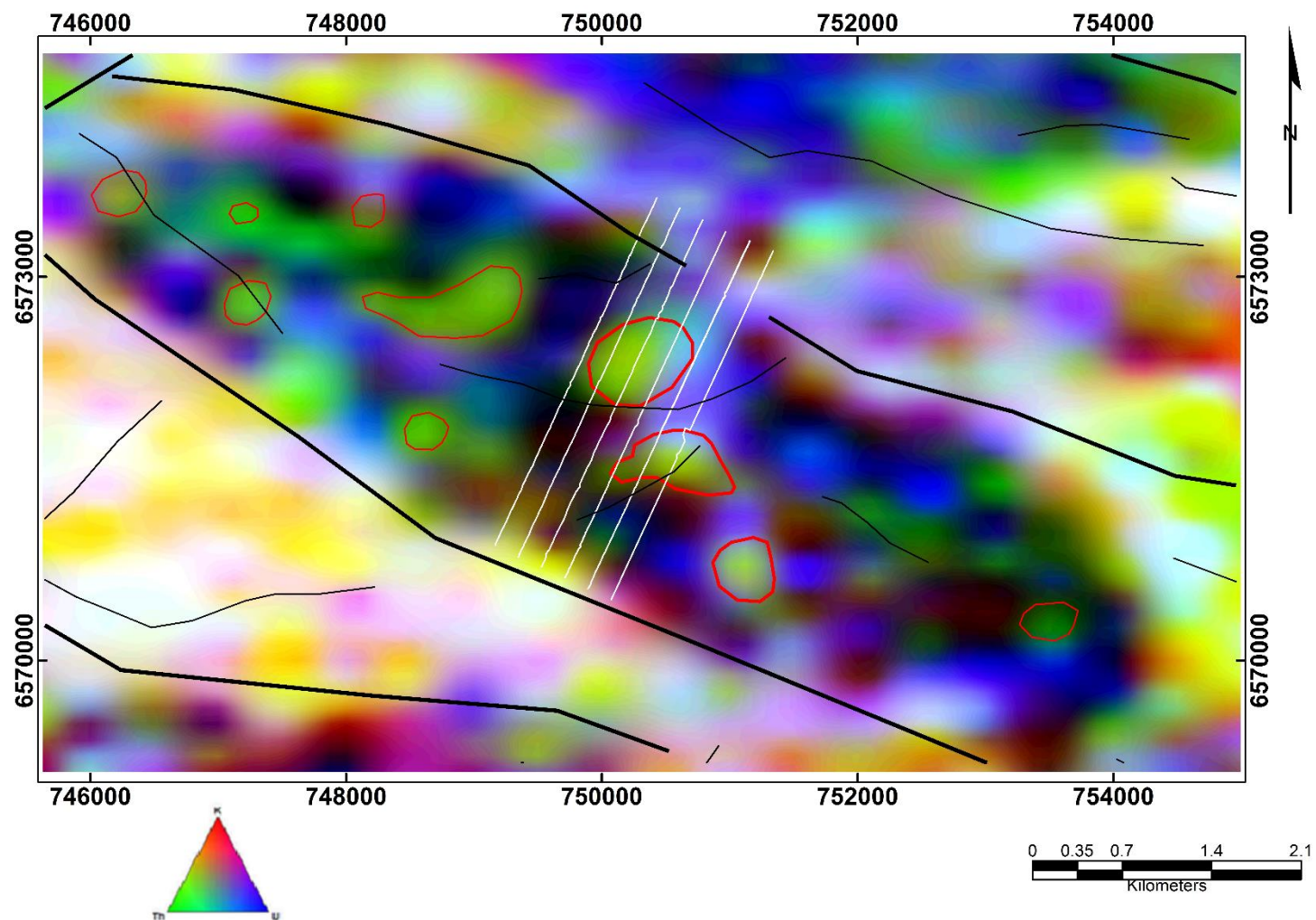
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 19 – Mapa Ternário e lineamentos.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 20 - Mapa Ternário e lineamentos, com anomalias destacadas e linhas de levantamento terrestre propostas.



Fonte: Produzido pela Autora.

9.2 Mapas Geofísicos - Aeromagnetometria

Com o objetivo de auxiliar na identificação da melhor localização para levantamento terrestre, além de detectar descontinuidades e limites litológicos, foram gerados diferentes mapas aeromagnetométricos no *Software Oasis MontajTM*, integrado a lineamentos geológicos.

9.2.1 Campo Magnético Anômalo Total

O campo magnético anômalo total (Figura 21) evidencia as anomalias após remoção do campo magnético terrestre do campo magnético total medido no levantamento. O mapa do campo magnético anômalo (CMA) apresenta as anomalias com padrão dipolar (anomalias destacadas). Este caráter dificulta sua interpretação. Por isso são gerados demais mapas derivados deste.

9.2.2 Redução ao Polo Magnético - RTP

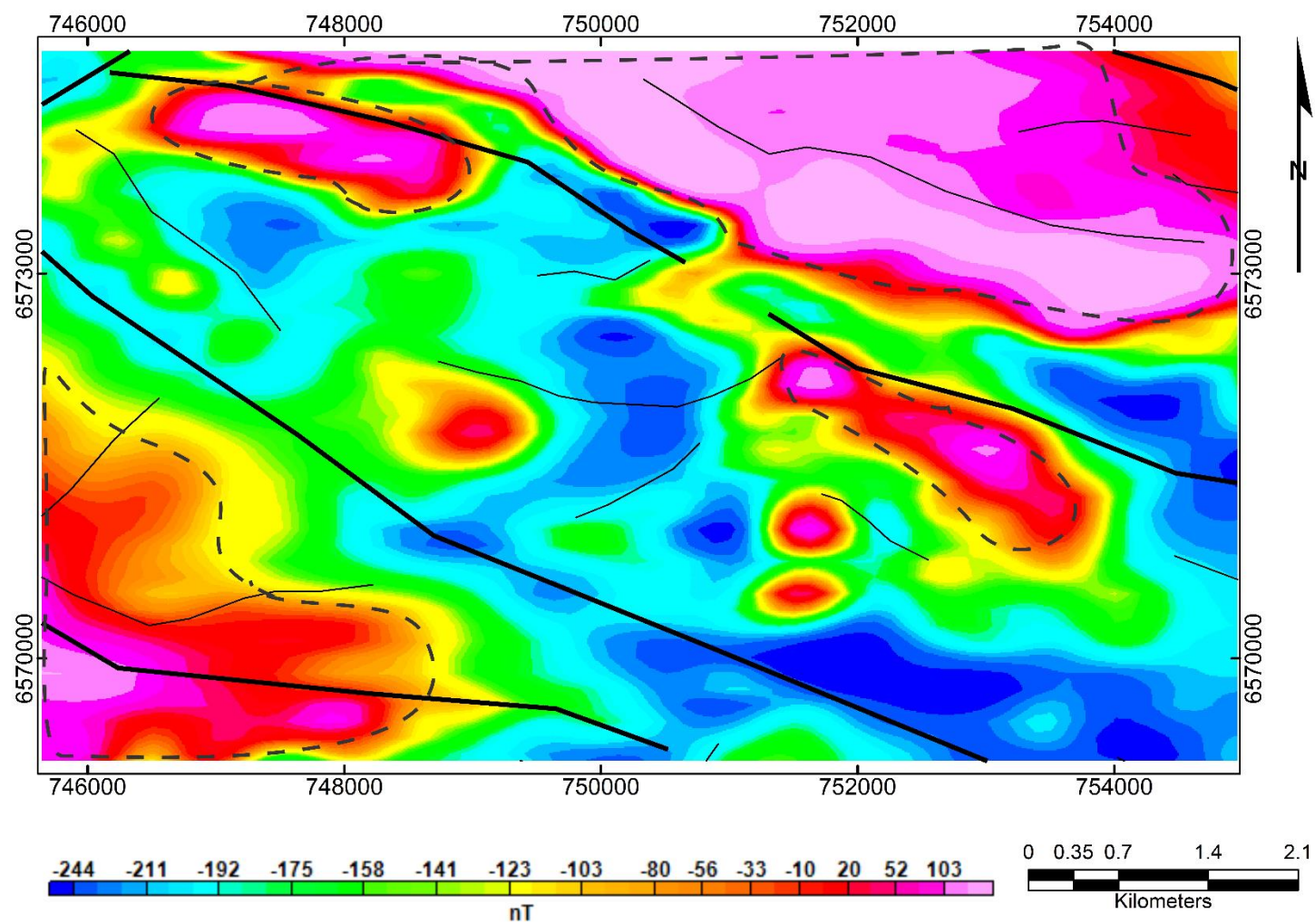
O Mapa de RTP (Figura 22), tem o objetivo de deslocar o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador, para localizar as fontes profundas causadoras de anomalias, pois as anomalias podem ser deslocadas devido a ação de declinação e inclinação do campo magnético. Outro fator a se destacar é o quanto os lineamentos são condizentes com o resultado, uma vez que temos diminuição ou baixos valores do campo magnético anômalo total em locais de lineamentos.

Afim de melhor visualização, as anomalias de maiores valores foram evidenciadas. Dentre as litologias mais susceptíveis a apresentar anomalias magnéticas significantes, encontram-se as rochas ígneas, em especial máficas e ultramáficas (Blakely, 1995). Observa-se que as anomalias localizadas a centro dos lineamentos correspondem as intrusões de Suítes (*Vauthier* e Campinas), exatamente as que apresentam anomalias significantes.

9.2.3 Amplitude do Sinal Analítico

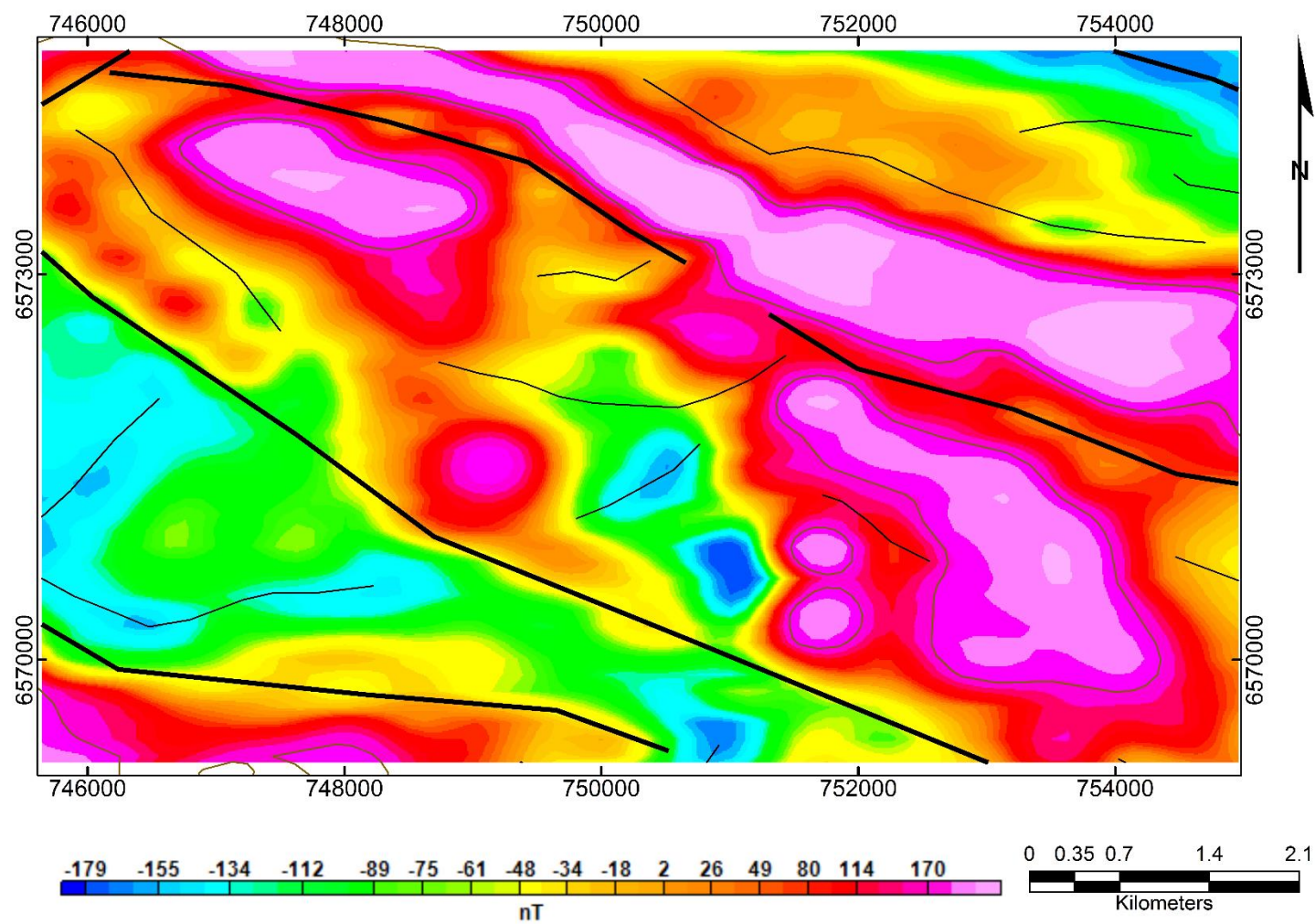
O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (Figura 23), mostra as bordas de anomalias e auxilia na localização de limites. O mapa ASA mostra as bordas/limite de todas as anomalias evidentes na área de estudo, evidenciando tanto anomalias oriundas do CGSMC, quanto das Suítes *Vauthier* e Campinas.

Figura 21 – Mapa de campo magnético anômalo total e lineamentos.



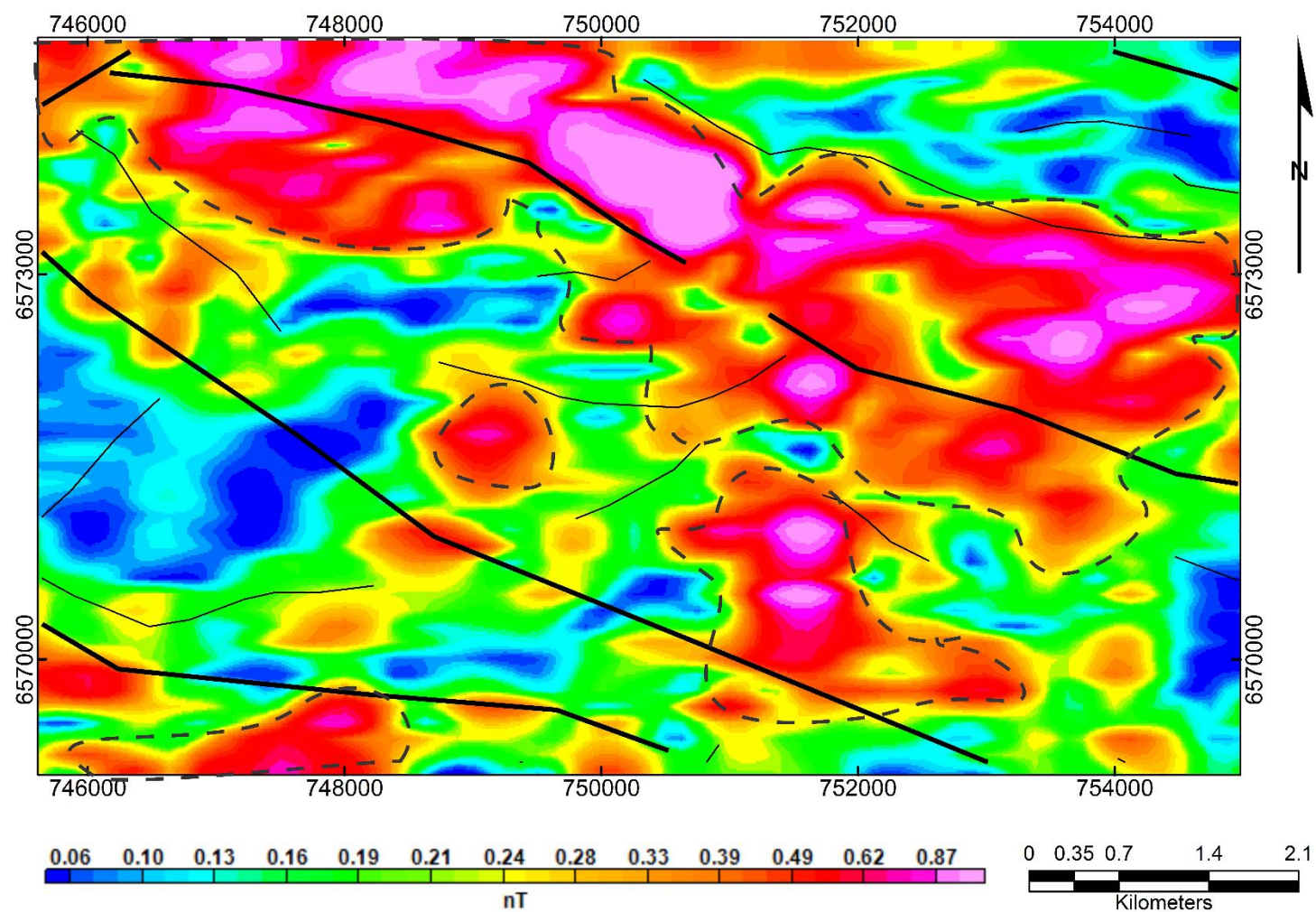
Fonte: Produzido pelo Autora.

Figura 22 - Mapa de Redução Magnética ao Polo, com lineamentos e anomalias destacadas.



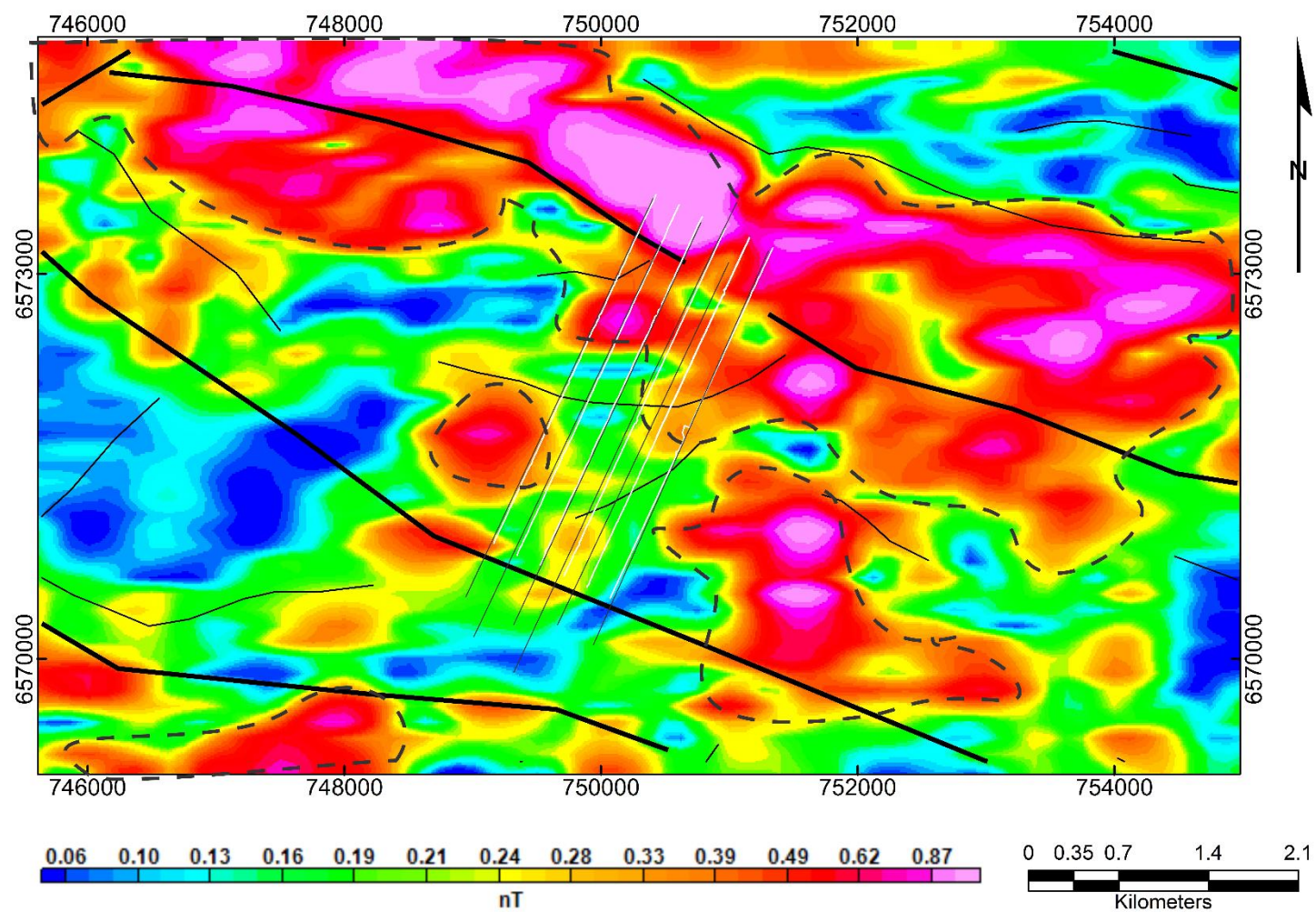
Fonte: Produzido pelo Autora.

Figura 23 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico, com borda de anomalias evidenciadas.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 24 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico com proposta de levantamento terrestre.



Fonte: Produzido pela Auto

Comparando os mapas aéreos de gamaespectrometria e magnetometria, percebe-se que as áreas com altas anomalias no centro do mapa de parâmetro F e altas anomalias de Potássio e Tório no centro do mapa ternário possuem baixos valores nos mapas aeromagnetométricos. Afim de classificar essa possível litologia, o levantamento magnetométrico terrestre, foi feito sob estas anomalias (Figura 24), como foi proposto ao final da seção 9.1.

9.3 Magnetometria Terrestre

Com o objetivo de interpretar anomalias não observáveis nos mapas aéreos, foram gerados mapas magnetométricos e respectivas técnicas de realce e filtragem no Software *Oasis MontajTM*.

9.3.1 Modelo Digital de Terreno - MDT

Para visualização do levantamento terrestre, foi gerado o MDT (Figura 25), com mapa de pseudo-iluminação e relevo. Logo observa-se um alto topográfico com variação altimétrica de 40 metros.

9.3.2 Campo Magnético Anômalo Total - CMA

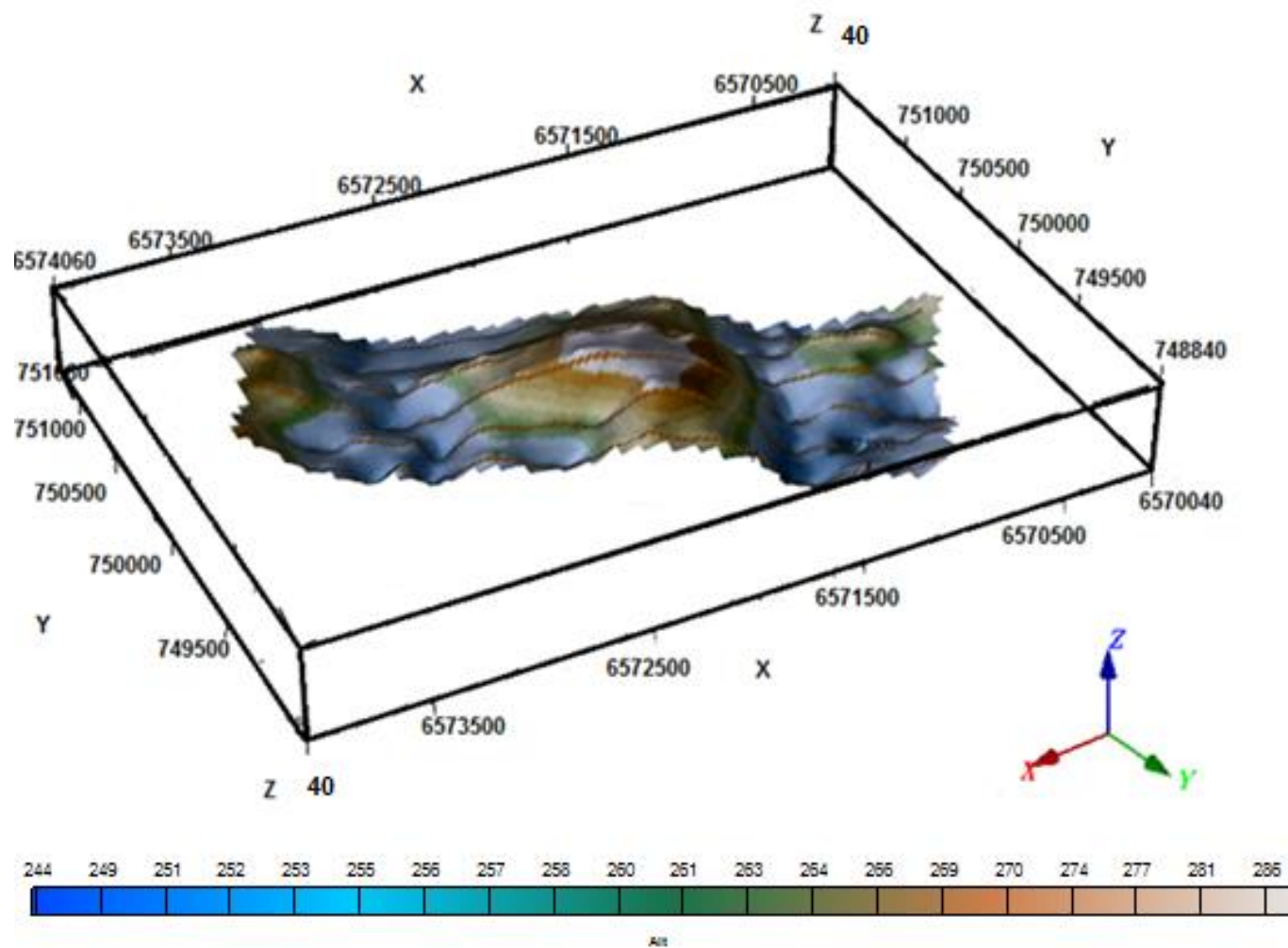
No campo magnético anômalo total são evidenciadas as anomalias após correções de IGRF e diurnas. O mapa de CMA (Figura 26) apresenta as anomalias com padrão dipolar (anomalias destacadas). Este caráter dificulta sua interpretação. Por isso, são gerados demais mapas derivados deste.

9.3.3 Regional e Residual

Para a separação das componentes regional e residual foi aplicado um filtro gaussiano, que funciona como uma passa-banda. Foi gerado um espectro de potência radial médio dos dados para identificar o intervalos de número de ondas adequados para a separação das componentes profundas e rasas. O corte para componentes profundas foi de 323 m^{-1} e 1670 m^{-1} e rasas foi de 100 m^{-1} e 164 m^{-1} .

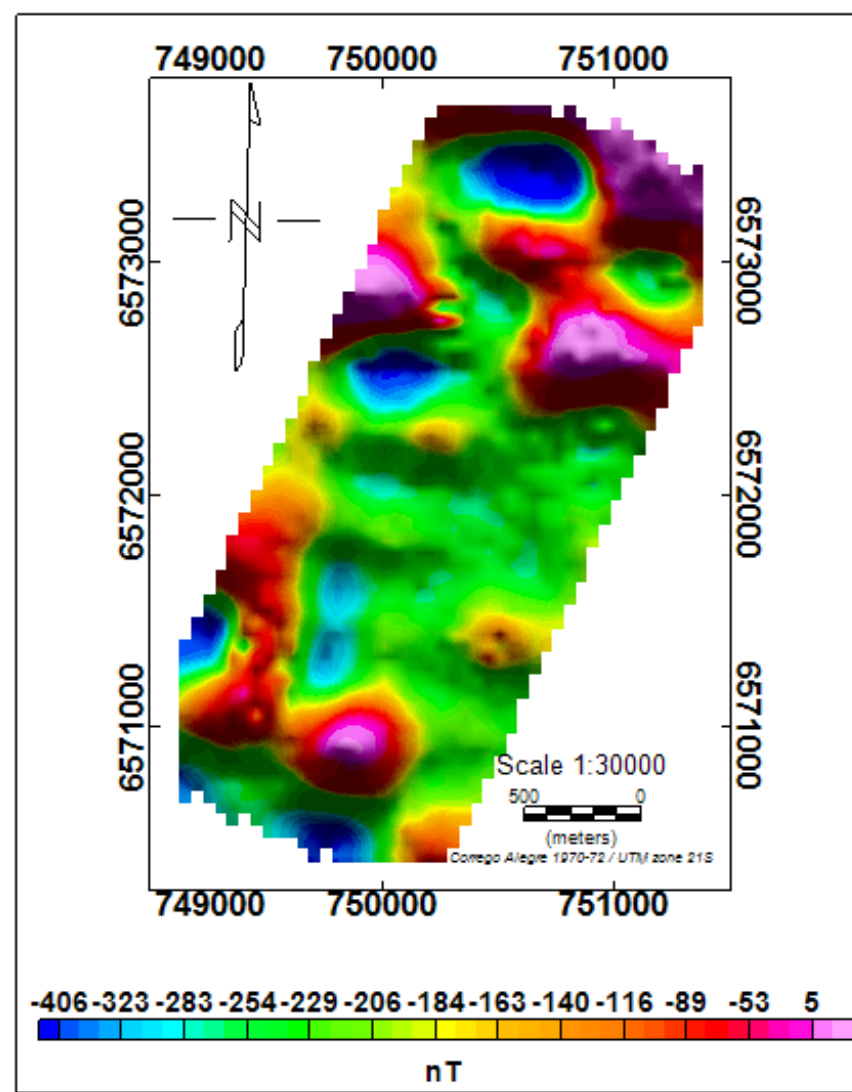
Ao comparar os mapas regional e residual Figura (27), observa-se que o ponto destacado no residual (A, B, C e D) com maior anomalia rasa tem anomalias de baixo valores nos mapa regional. Interpreta-se que estas partes rasas do residual são oriundas de geologia das suítes, uma vez que as suítes têm alojamento em profundidades rasas

Figura 25 – Modelo Digital de Terreno (MDT) do levantamento terrestre.



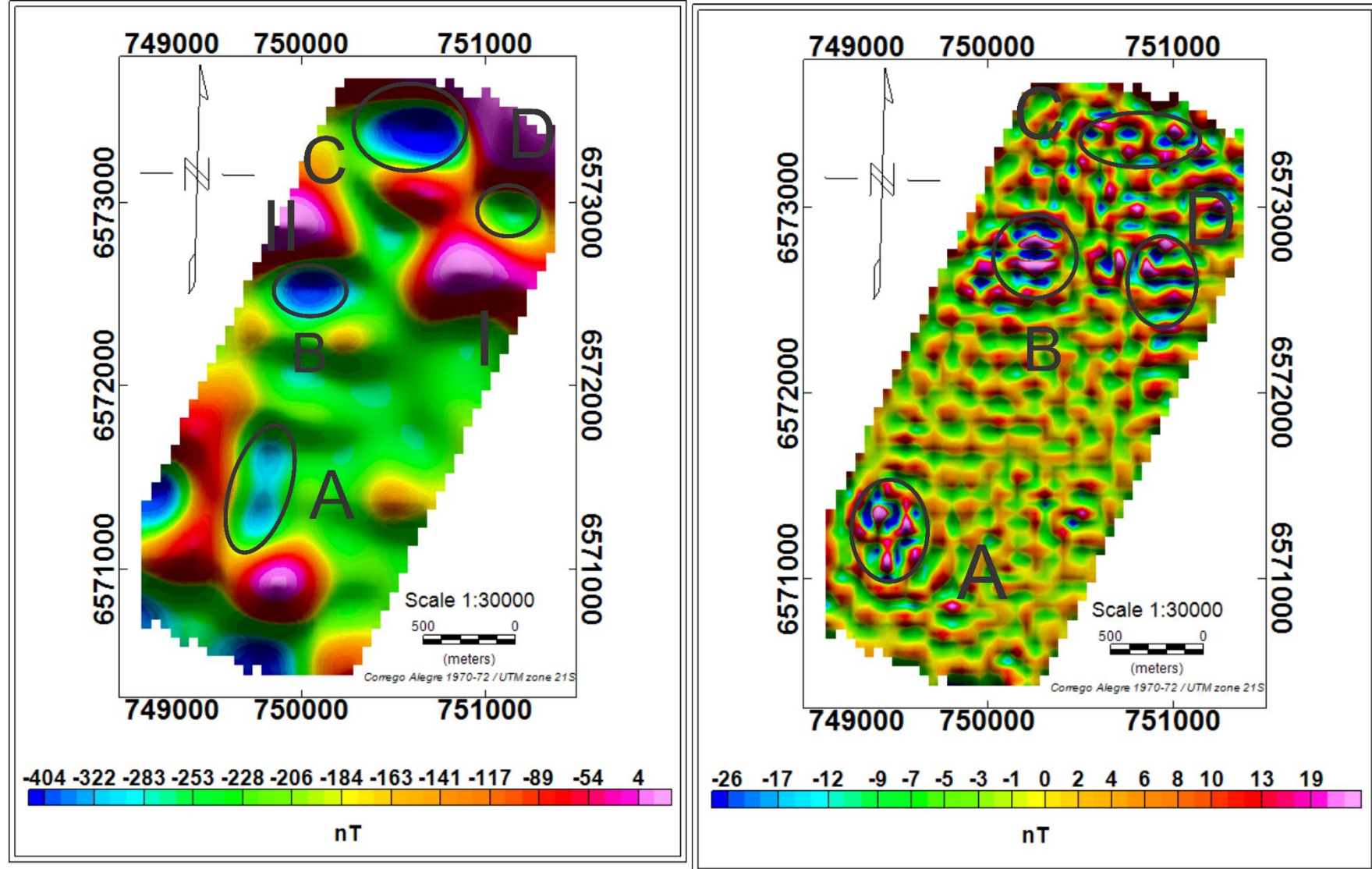
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 26 – Mapa de Campo Magnético Anômalo Total.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 27 – Mapa Regional e Residual, com anomalias destacadas.



Fonte: Produzido pela Autora.

9.3.4 Redução ao Polo Magnético - RTP

O mapa de redução ao polo magnético foi submetido ao filtro Convolução *Hanning*, uma vez que este foi gerado em janela 3x3 (HNG 3X3), após a percepção de uma superfície de tendência no sentido de aquisição das linhas. Logo, para a suavização da corrugação, este foi aplicado também aos próximos mapas.

O mapa de redução ao polo magnético (Figura 28) posiciona as anomalias ao centro das suas fontes causadoras. Observa-se que o centro das anomalias A e B são correspondentes ao anomalias I e II do mapa regional respectivamente. Ambas as anomalias são de caráter profundo, sendo então associadas ao CGSMC.

9.3.5 Amplitude do Sinal Analítico - ASA

O mapa de Amplitude do Sinal Analítico (Figura 29) mostra as bordas/limite de anomalias evidentes na área de estudo. A anomalia em destaque (A) mostra o limite desta anomalia propondo que a parte ao redor com baixos valores, é referente a outra litologia, enquanto as partes de alto valor são correspondentes a uma segunda litologia.

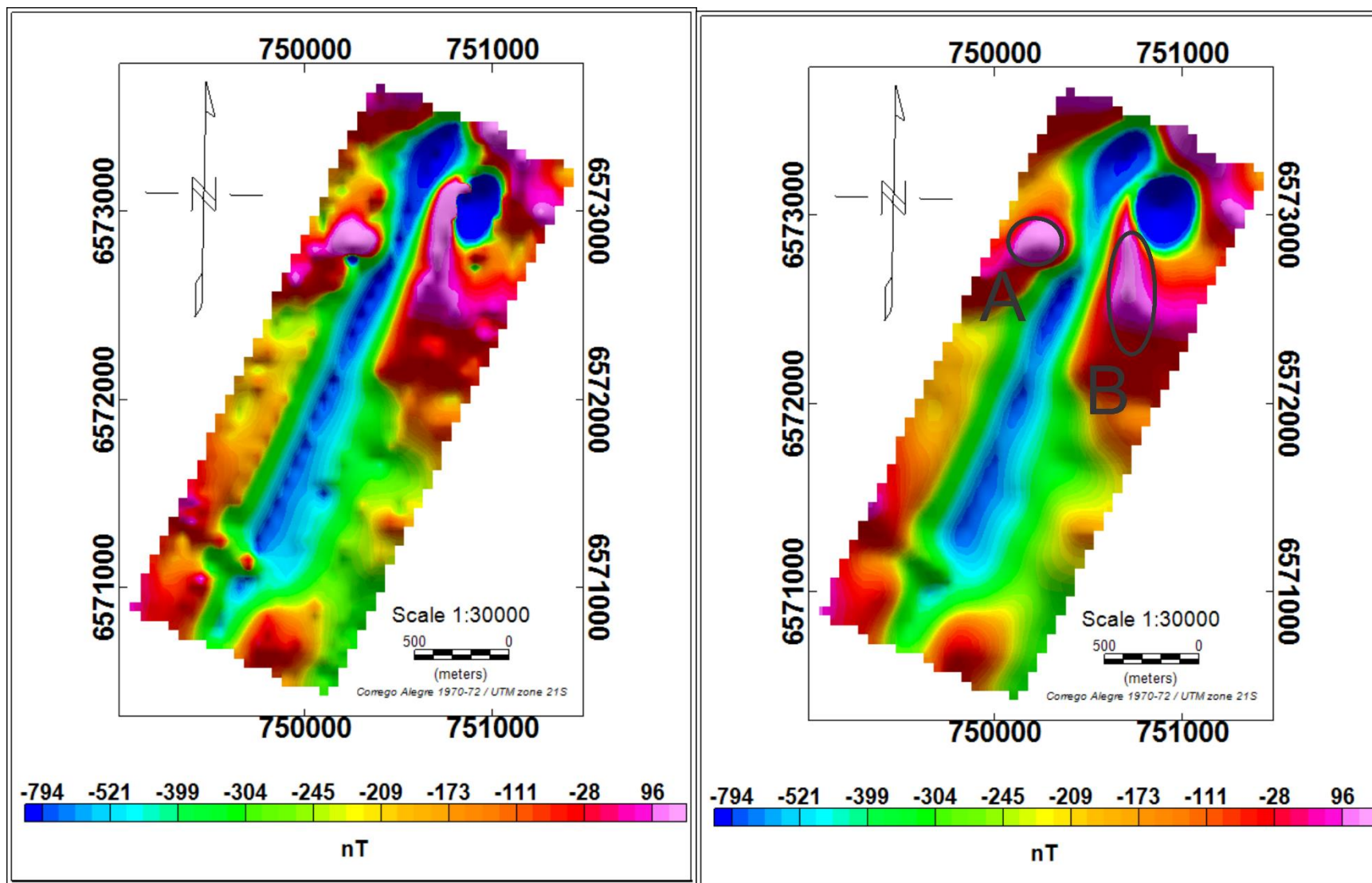
9.3.6 Primeira Derivada Vertical – 1DV

O mapa da derivada vertical é aplicado nos dados de campo potenciais para realçar as fontes geológicas rasas. Logo, o mapa de primeira derivada vertical (Figura 30) tem anomalias de fontes rasas sendo evidenciadas (A, B e C), podendo ser associada as suítes da área de estudo.

9.3.7 Derivadas Direcionais – X, Y e Z

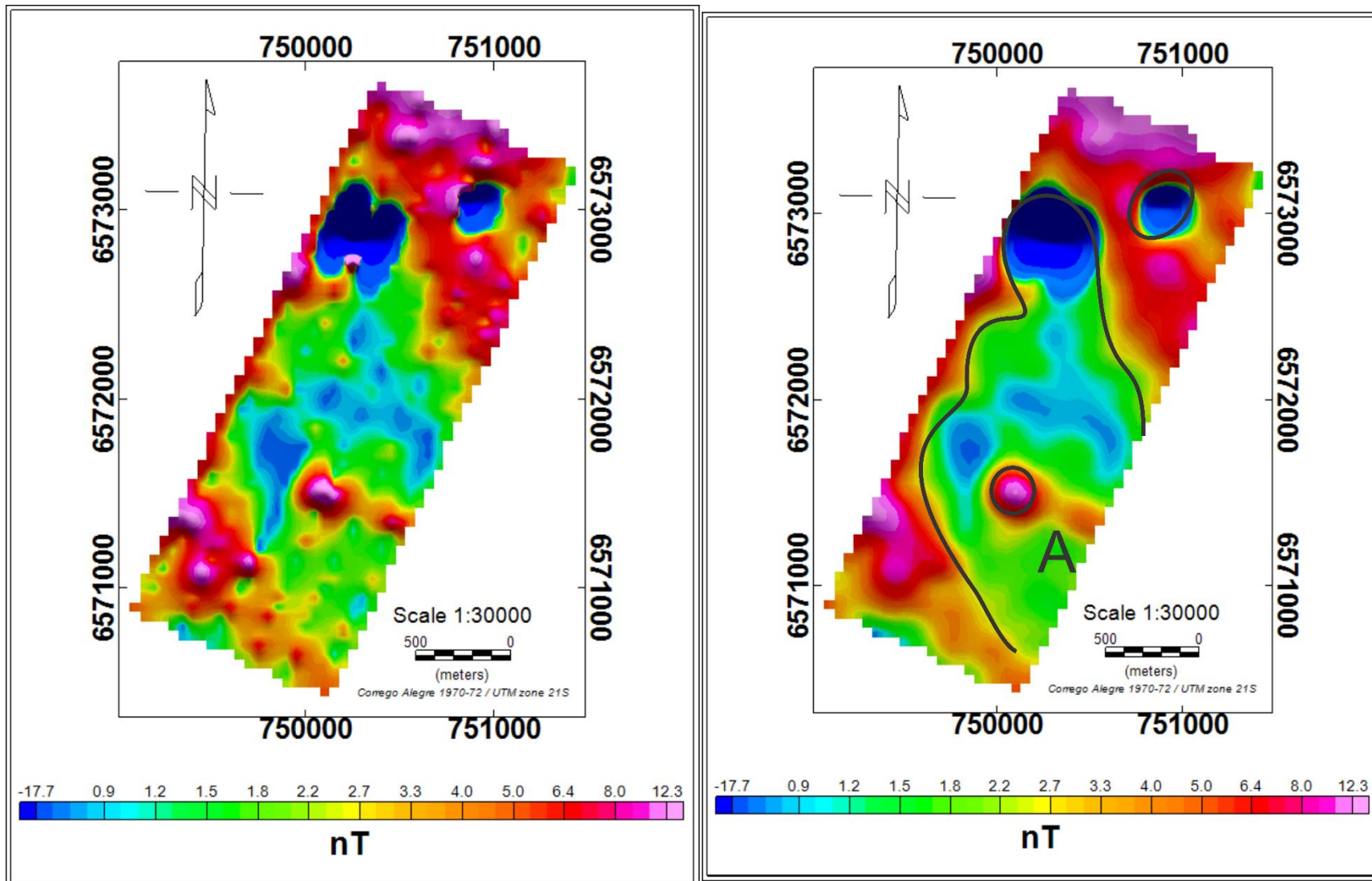
Os filtros direcionais são capazes de realçar ou remover feições lineares. A derivada em X realça anomalias a E-W (Figura 31-A). A derivada em Y realça as anomalias a N-S (Figura 31-B) e a derivada em Z (Figura 31-C), as anomalias de fontes mais rasas. Logo, a derivada em Z auxiliou na identificação de anomalias rasas, sendo estas localizadas nas mesmas áreas de anomalias relevantes no mapa residual, sendo interpretadas como oriundas de suítes.

Figura 28 – Mapa de Redução ao Polo Magnético, com anomalias destacadas.



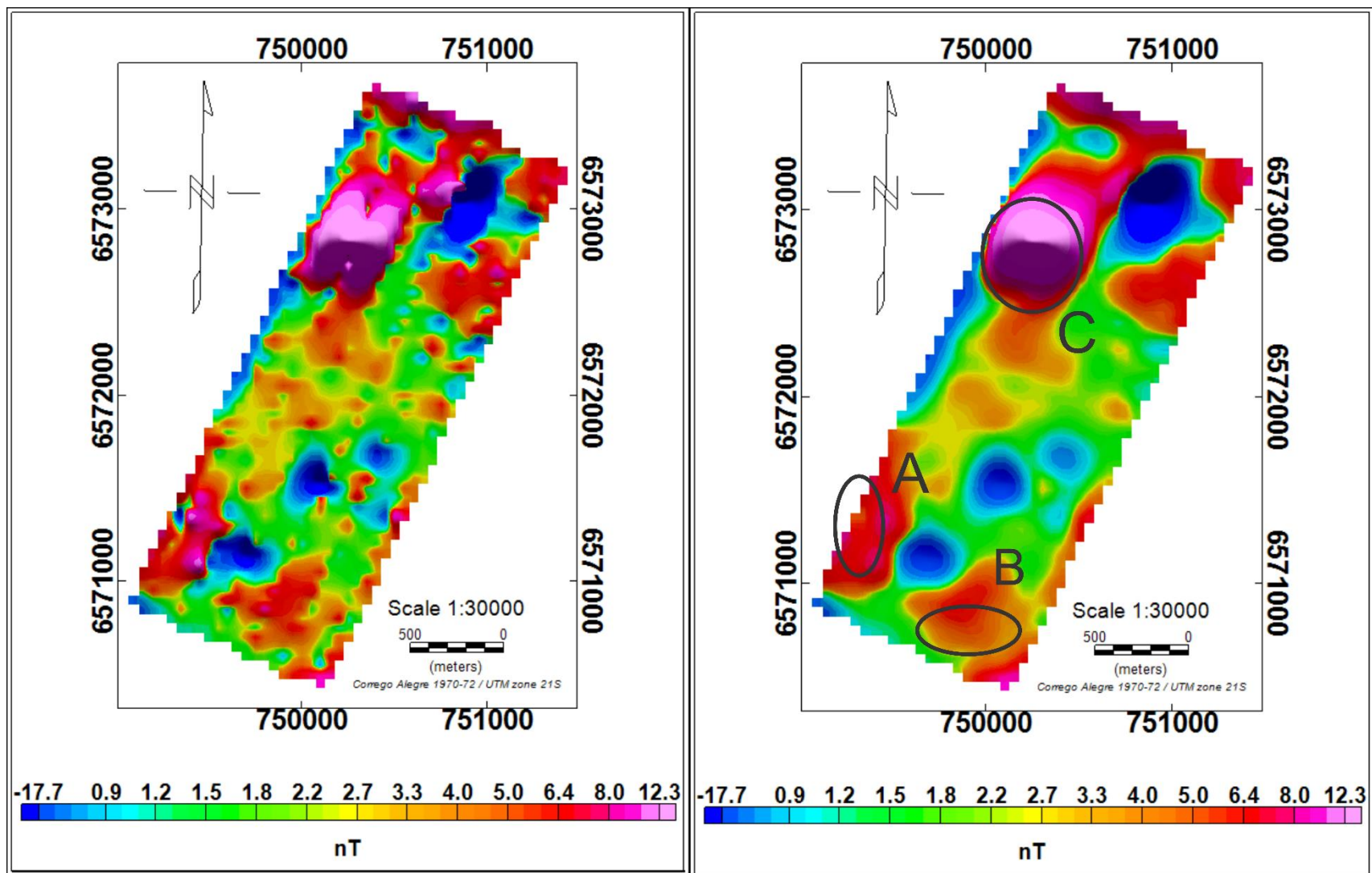
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 29 – Mapa de Amplitude do Sinal Analítico, com anomalias destacadas.



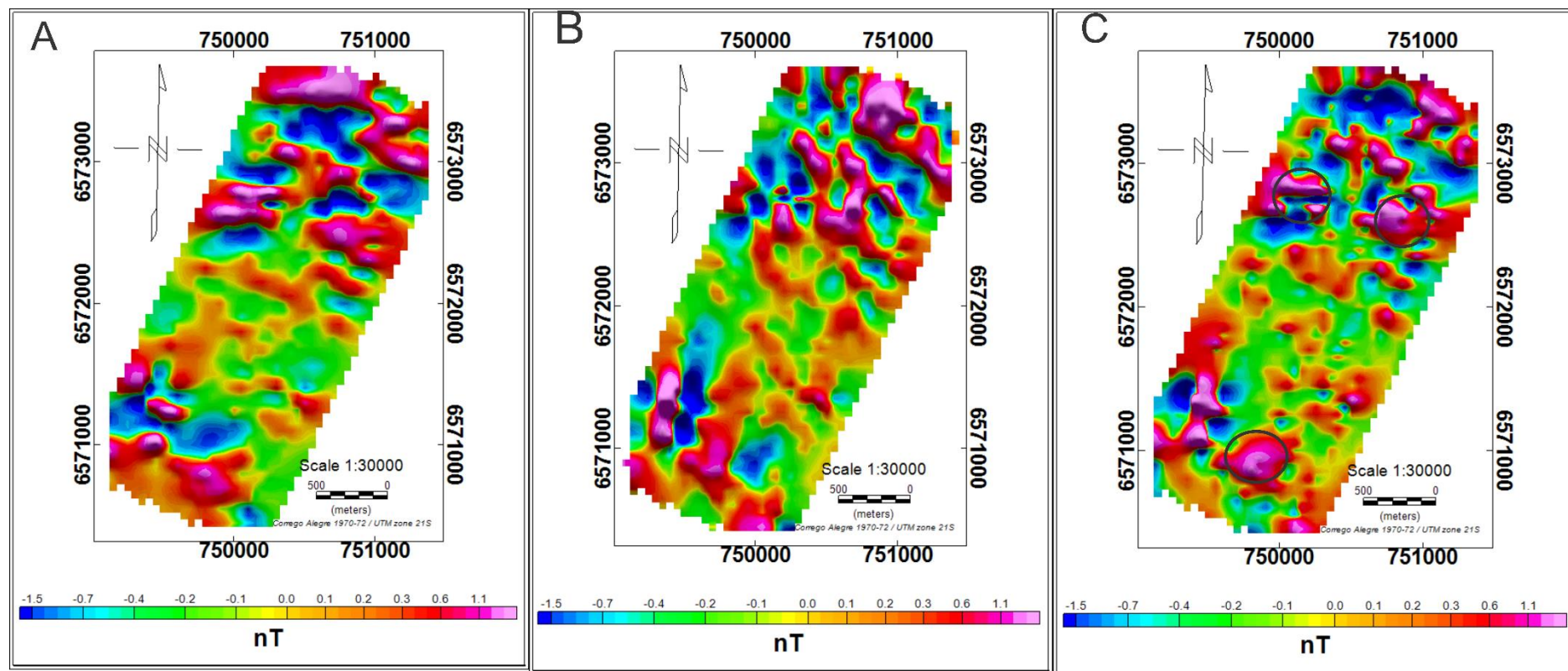
Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 30 – Mapa de Primeira Derivada Vertical, com anomalias destacadas.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 31 – Mapa de derivadas direcionais e anomalias destacadas no mapa de derivada Z (C).



Fonte: Produzido pela Autora.

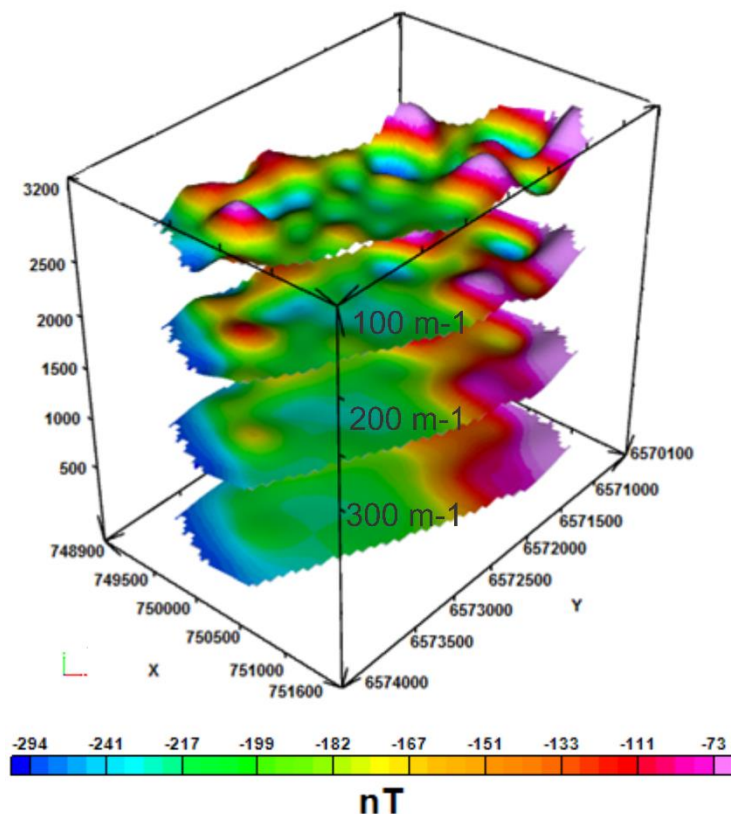
9.3.8 Continuação para Cima

Este filtro atenua as anomalias de acordo com a frequência, ou seja, quanto menor a frequência, melhor a atenuação. Este também pode ser considerado um filtro de limpeza porque quase não produz efeitos de borda.

O mapa de campo magnético anômalo total, com filtro de continuação para cima (Figura 32), foi usado para remover ou minimizar os efeitos de fontes rasas, afim de identificar apenas as profundas. Ele foi gerado pela rotina MagMap do *Software Oasis MontajTM*, onde o grid foi submetido ao domínio da frequência. Esta rotina calcula o espectro de potência radial (*Radially Averaged Power Spectrum*) denominado de *RAPS*, dando os comprimentos de onda ideais para serem cortados (*Cut-off values*). Para produzir este mapa, aplicou-se cortes de comprimento de onda de 100 m^{-1} , 200 m^{-1} e 300 m^{-1} , sendo que o primeiro (de cima para baixo) é o mapa de origem (mapa campo magnético anômalo total).

As anomalias que permanecem até o último mapa são oriundas de fontes profundas, associando estas ao CGSMC.

Figura 32 – Mapa Regional com filtro continuação para cima, com corte em diferentes comprimentos de onda.



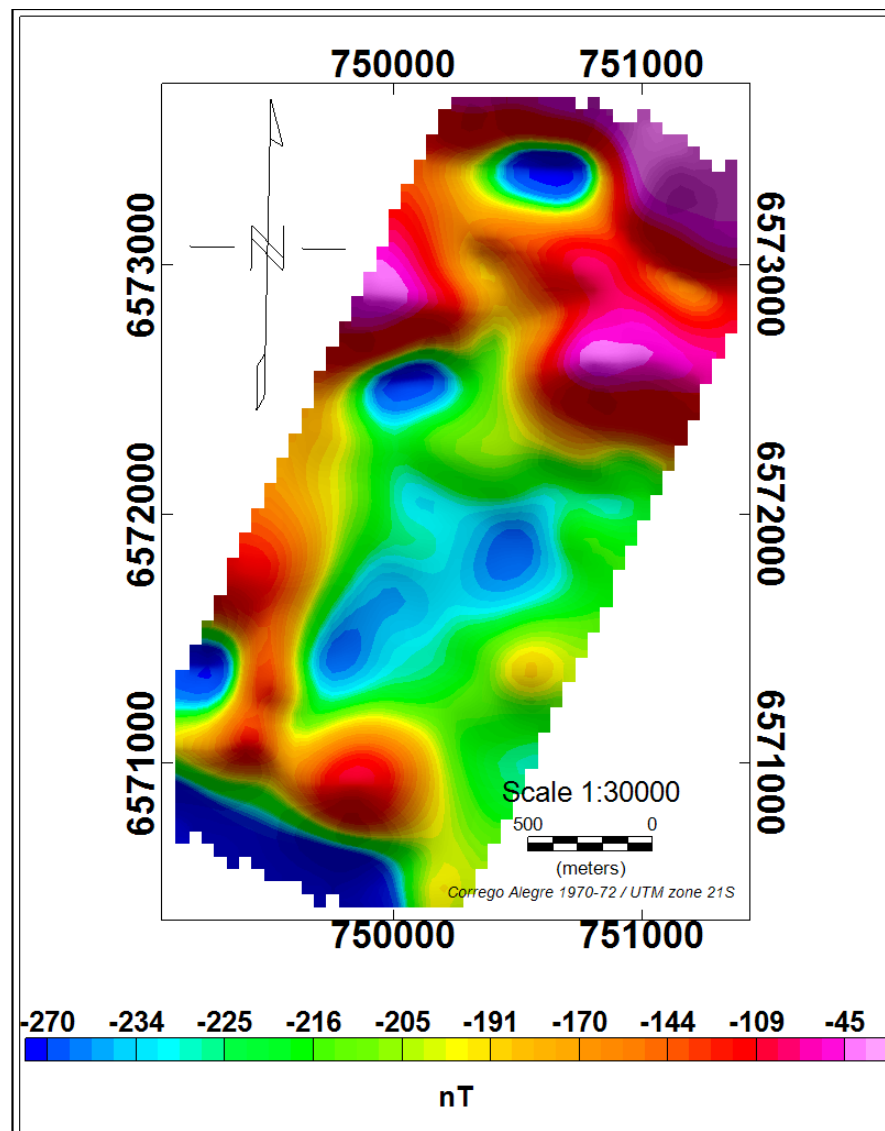
Fonte: Produzido pela Autora.

9.3.9 Continuação para Cima e Passa Baixa

Os dados de campo magnético anômalo total foram submetido a filtros de Continuação para Cima e posteriormente Passa Baixa. Estes são utilizados para minimizar respostas de altas frequências (fontes rasas). O mapa (Figura 33) foi gerado novamente pela rotina MagMap do *Software Oasis MontajTM*, onde os parâmetros utilizados na continuação para cima foi de 100 m^{-1} , e o passa baixa cortou comprimentos de onda de 164 m^{-1} .

O mapa mostra altos valores para anomalias já discutidas anteriormente, classificadas como parte do CGSMC, e baixos valores para áreas relacionadas as suítes.

Mapa 33 – Mapa de Continuação para Cima e Passa Baixa.



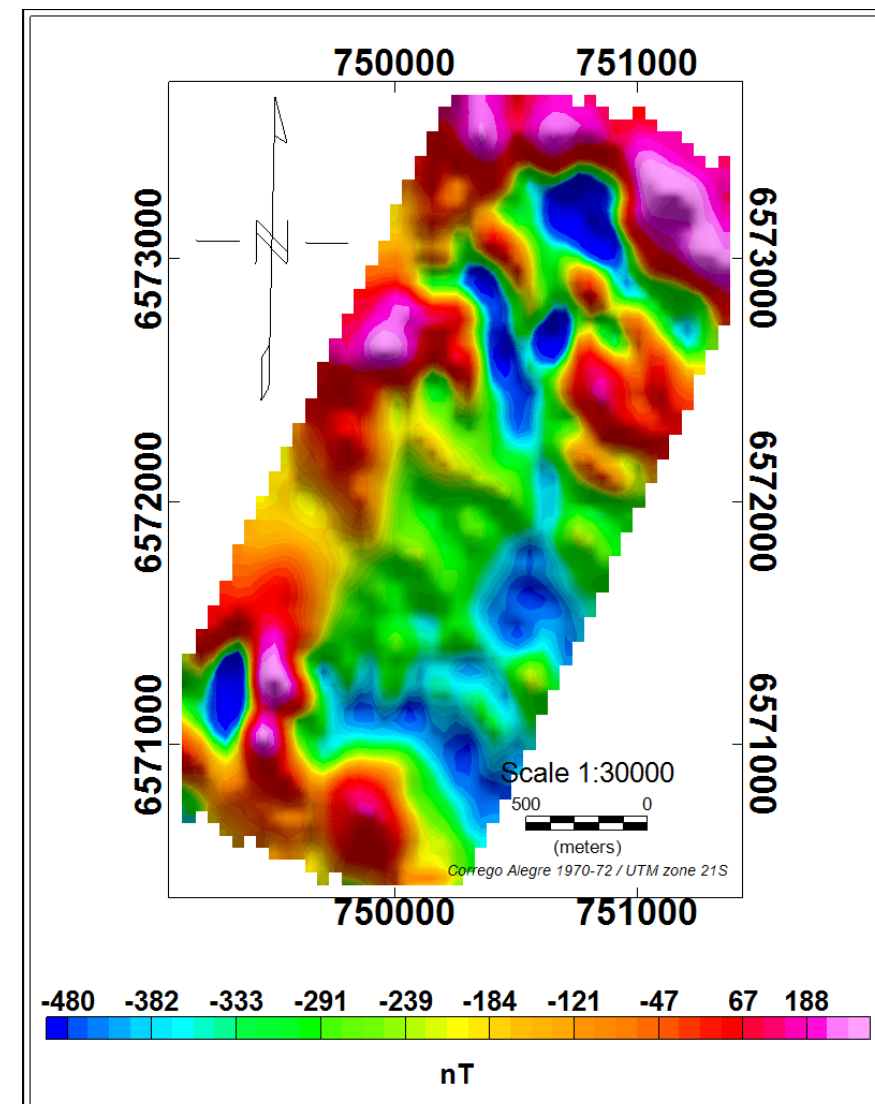
Fonte: Produzido pela Autora.

9.3.10 Redução ao Polo Magnético (RTP) e Passa Baixa

Os dados de campo magnético anômalo total foram submetido também a filtros de RTP e posteriormente Passa Baixa. Estes são utilizados para minimizar respostas de altas frequências (fontes rasas) e centralizar as anomalias de interesse as suas fontes causadoras. O mapa (Figura 34) foi gerados novamente pela rotina MagMap do *Software Oasis MontajTM*, onde os parâmetros utilizados na redução ao polo foram os valores declinação -14° e inclinação -38° , e o passa baixa cortou comprimentos de onda de 164 m^{-1} .

Novamente, fica evidente a diferença entre litologias do CGSMC, com valores anômalos altos e centralizados as suas fontes, e das Suítes *Vauthier* e *Campinas*, com valores baixos.

Figura 34 – Mapa de Redução Magnética ao Polo e Passa Baixa.



Fonte: Produzido pela Autora.

9.4 Análise Semi-Quantitativa

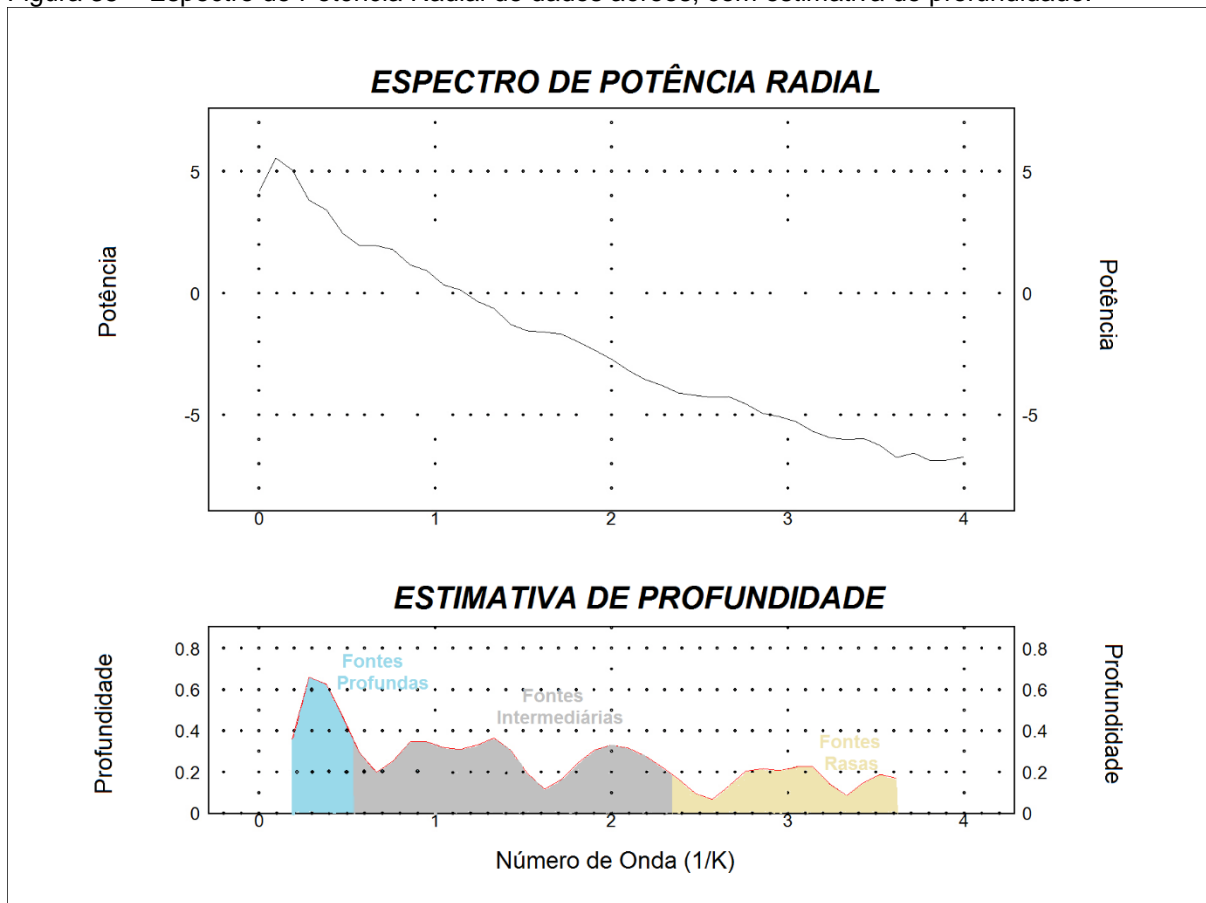
9.4.1 Dados Aeromagnetométricos

A análise semi-quantitativa é uma abordagem muito importante na definição e compreensão da localização (profundidade) das fontes anômalas apresentadas nos mapas geofísicos, oriundas das discontinuidades e litologias. Quando associada a uma modelagem, possibilita uma boa caracterização de limites litológicos e estruturais não aflorantes (Bongiolo, 2011).

O espectro de potência radial foi gerado através da conversão para o domínio da frequência pela transformada rápida de Fourier (*Fourier Fast Transform - FFT*) e, através de uma análise dos diferentes coeficientes angulares presentes no gráfico, foi possível distinguir a profundidade média teórica das fontes profundas, médias e rasas e o comprimento de onda ou frequência a elas relacionada (Figura 35).

Os valores calculados para as profundidades médias através do espectro de potência foram 2,06 km para fontes profundas, 1,71 km para fontes intermediárias e 0,75 km para fontes rasas.

Figura 35 – Espectro de Potência Radial de dados aéreos, com estimativa de profundidade.



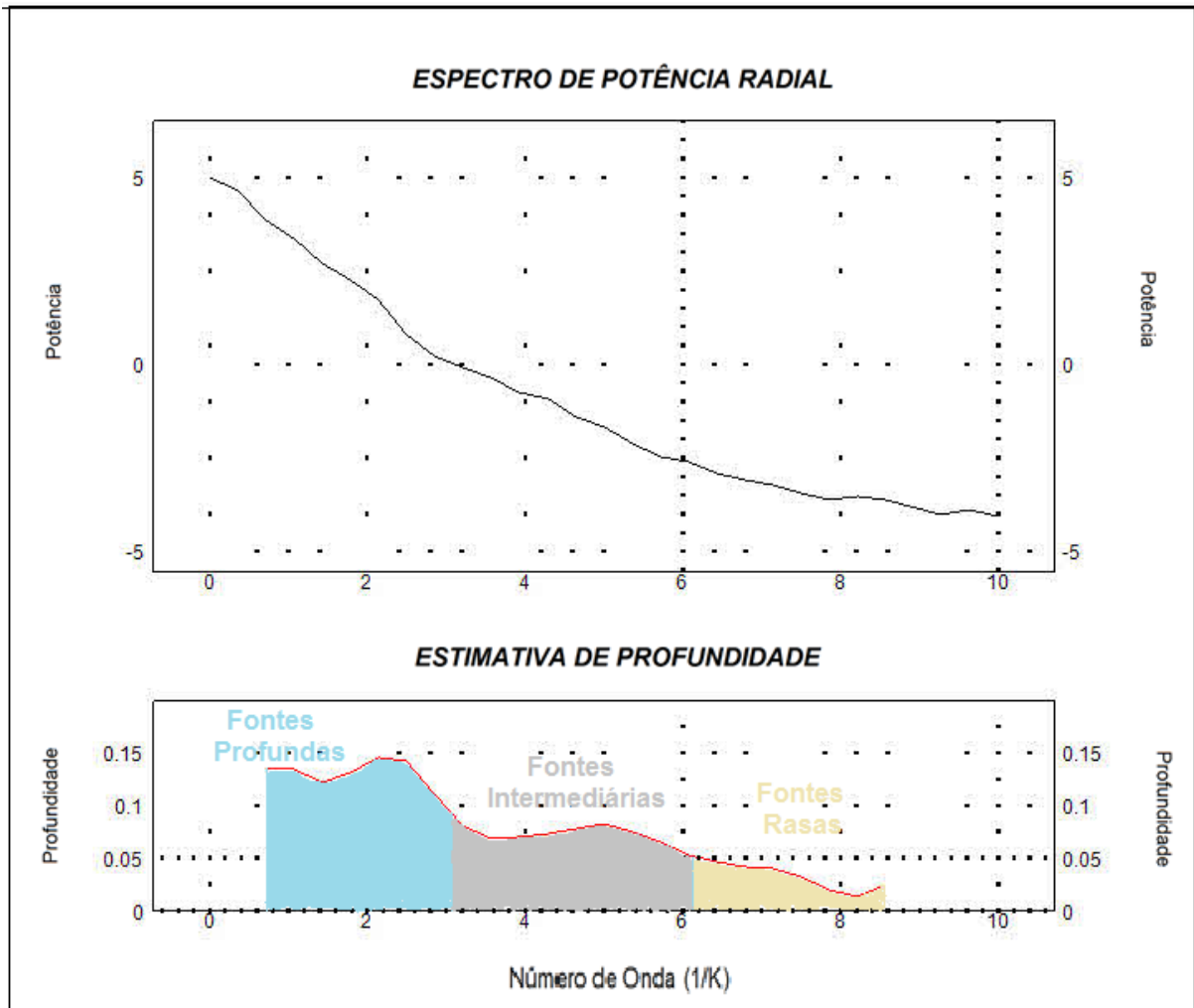
Fonte: Produzido pela Autora.

Os números de onda (eixo x do gráfico, ilustrado na figura 37) oriundo de fontes profundas, estão entre 0 km^{-1} a $1,0 \text{ km}^{-1}$. Os números de ondas superiores representam anomalia intermediárias ($1,0 \text{ km}^{-1}$ a $3,0 \text{ km}^{-1}$), anomalias rasas ($3,0 \text{ km}^{-1}$ a $12,0 \text{ km}^{-1}$) e ruído (observado principalmente na faixa de anomalias rasas).

9.4.2 Dados Terrestres

O espectro de potência radial também foi gerado para os dados terrestres, com com mesma rotina do espectro anterior. Os valores calculados para as profundidades médias através do espectro de potência foram 1,9 km para fontes profundas, 1,31 km para fontes intermediárias e 0,22 km para fontes rasas (Figura 36).

Figura 36 – Espectro de Potência Radial de dados terrestres, com estimativa de profundidade.



Fonte: Produzido pela Autora.

Os números de onda (eixo x do gráfico, ilustrado na figura 38) oriundo de fontes profundas, estão entre 0 km^{-1} a $3,0 \text{ km}^{-1}$. Os números de ondas superiores

representam anomalia intermediárias ($3,0 \text{ km}^{-1}$ a $6,0 \text{ km}^{-1}$), anomalias rasas ($6,0 \text{ km}^{-1}$ a $9,0 \text{ km}^{-1}$) e ruído (observado principalmente na faixa de anomalias rasas).

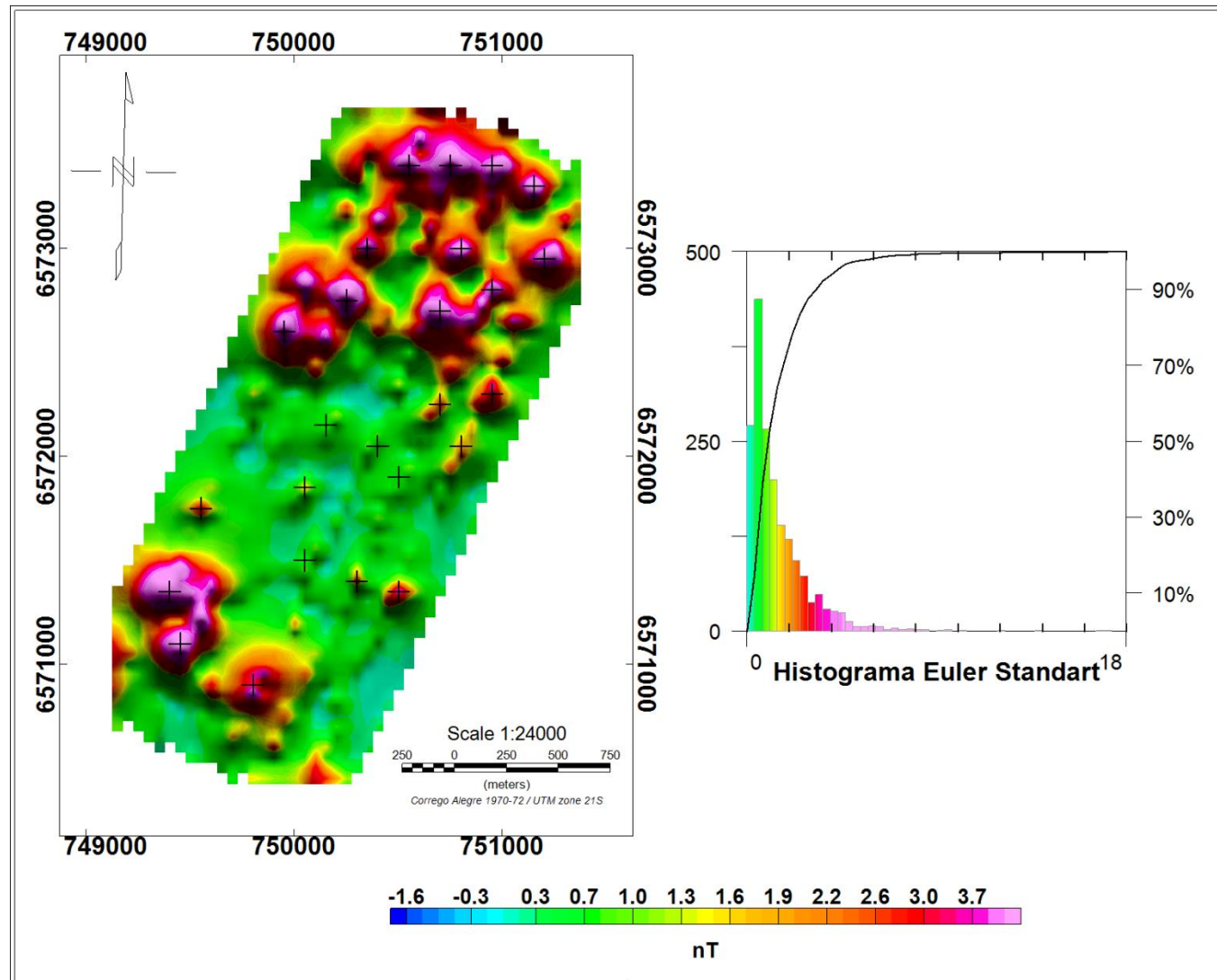
9.4.3 Deconvolução de Euler

A aplicação do método foi realizada através do programa *Oasis Montaj* com base na análise espectral feita anteriormente. Dessa maneira, aplicou-se um filtro passabanda para isolar as anomalias relativas às fontes intermediárias, visando um maior detalhamento das profundidades deste nível. Considerando o formato de dique tabular de comprimento infinito como a fonte anômala mais proeminente na área, utilizou-se um fator estrutural $h = 1$ (modelo de dique), adotando-se uma tolerância de 15% para o posicionamento e profundidade das fontes. Foram adotados três tamanhos de janela de busca: 3.000, 5.000, 10.000 metros, visando determinar soluções de fontes cada vez mais profundas. A Figura 37 mostra o mapa de profundidades de fontes gerado a partir de janelas de 3.000 metros, juntamente com o histograma de sua distribuição.

No mapa (Figura 37) observa-se que as anomalias a nordeste são provenientes de fontes mais profundas, podendo atingir aproximadamente 4km. Nele também evidencia-se a localização das fontes que geraram altas anomalias de campo magnético anômalo total. Em conjunto com os demais mapas, conclui-se que as anomalias provenientes de grandes profundidades podem ser associadas ao CGSMC. A sudoeste observa-se também anomalias que podem atingir estas profundidades.

O histograma evidencia que na área selecionada para ser realizado o levantamento terrestre, que é a Suíte Sub-Vulcânica *Vauthier*, tem predominantemente fonte de anomalias rasas. A parte oriunda de fontes profundas se localiza em áreas exatamente de contato com o CGSMC.

Figura 37 – Mapa de Deconvolução de Euler e histograma.



Fonte: Produzido pela Autora.

9.4.4 Dados Magnetométricos Terrestres

9.5 Modelagem Inversa – VOXEL

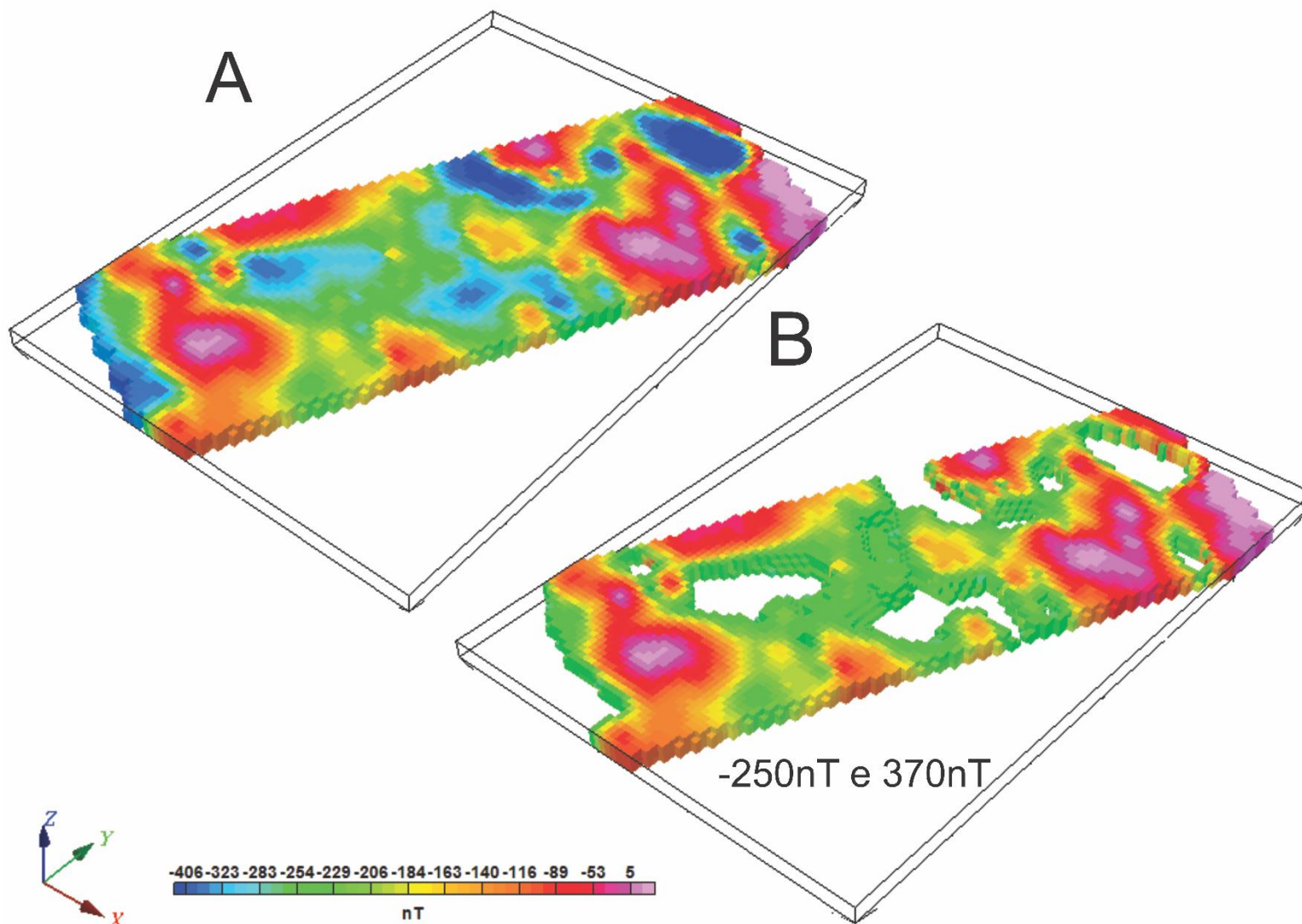
O *voxel* é uma ferramenta que permite uma análise 3D de um *pixel* 2D. Este é considerado uma operação apenas computacional, onde não é inserido nenhum parâmetro que não sejam os dados da anomalia desejada e o espaçamento da célula do *grid*. Afim de incrementar uma análise, o *Voxel* é proposto para a área de estudo, uma vez que ele é muito utilizado em análise de grandes conjuntos de dados de exploração, devido à sua facilidade de operação.

O mapa de campo magnético anômalo total 3D (Figura 38 e 39) foi gerado com um *grid* de 50X50m. Entretanto, previamente pode-se observar que o modelo 3D gerado (figura 38 e 39), possui características semelhantes as anomalias de campo magnético anômalo total (seção 9.3.2, Figura 26) e Regional (seção 9.3.3, Figura 27-A). Na superfície do modelo é possível observar anomalias de fontes profundas, que também foram destacadas no Mapa Regional.

A partir da filtragem da exibição dos valores das anomalias do campo magnético anômalo total no mapa 3D, o mapa pode ser melhor analisado. Foram selecionados valores de anomalias referentes aos altos de campo anômalo, buscando uma melhor compreensão de como se dispõem os valores de susceptibilidade em profundidade. Aplicou-se o filtro para eliminação dos baixos magnetométricos. Os valores de corte foram -250nT e 370nT para o modelo referente a Figura 38-B, -210nT e 370nT para o modelo referente a Figura 39-C e -170nT e 370nT para o modelo referente a Figura 39-D.

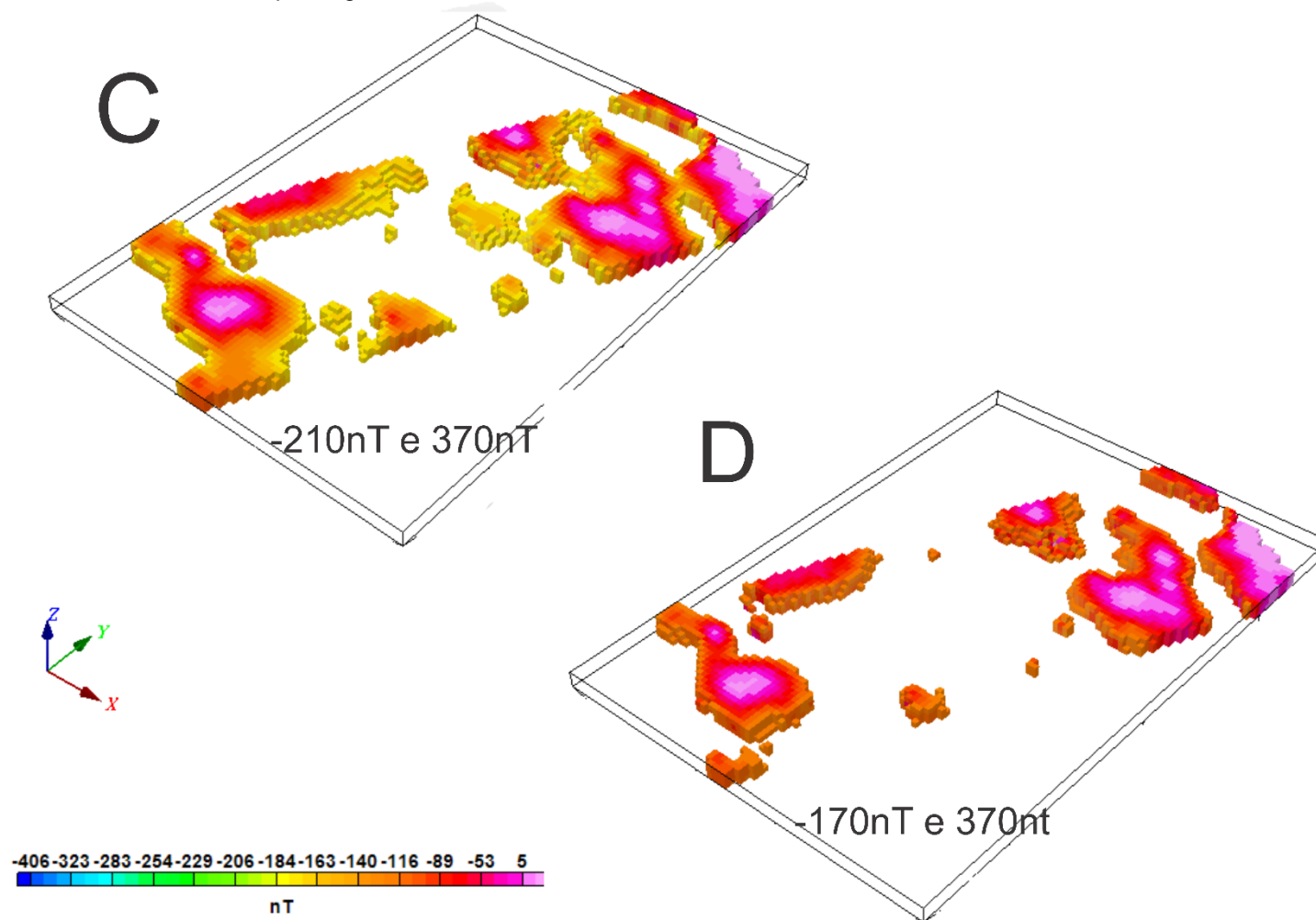
É possível observar uma alta influência de anomalias magnetométricas positivas na área que, a partir do mapa 3D, podem ser relacionadas a grandes volumes de corpos rochosos de alta susceptibilidade e em profundidades elevadas. No contexto geológico em questão, é de se esperar feições geradoras desse tipo de anomalia, podendo estar correlacionadas com a presença de litologias mais susceptíveis a apresentar anomalias magnéticas significantes, em especial máficas e ultramáficas, ou outra correlação litológica/estrutural condizente com a geologia da área e que apresente susceptibilidade elevada.

Figura 38 – Mapa 3D de anomalia de Campo Magnético Anômalo Total.



Fonte: Produzido pela Autora.

Figura 39 – Mapa 3D de anomalia de Campo Magnético Anômalo Total.



Fonte: Produzido pela Autora.

10 CONCLUSÃO

A geofísica tem sido muito utilizada no cenário de exploração mineral, devido à detecção de novas mineralizações, auxílio em mapeamento, caracterização de litologias e identificação de lineamentos terem alcançado resultados adequados. A integração de dados aéreos e terrestres, juntamente com análise de dados e a técnicas de realce, facilitam a identificação e diferenciação de litologias e estruturas.

Os levantamentos aéreos contribuíram com resultados satisfatórios, na caracterização e distinção de litologias e estruturas, uma vez que a aerogamaespectrometria evidenciou a dispersão de radioelementos nas rochas que compõem o CGSMC e as Suítes Sub-Vulcânica *Vauthier* e Campinas. Enquanto, a aeromagnetometria evidenciou anomalias magnéticas significantes, comprovando que estas encontram-se em rochas ígneas, em especial máficas e ultramáficas.

A aquisição terrestre de detalhe proposto atingiu o objetivo, pois as anomalias não correlacionadas geologicamente no levantamento aéreo, foram identificadas no levantamento de dados, onde se alcançou diferentes níveis de profundidades, conseguindo ainda determinar prováveis profundidades de fontes profundas.

A partir do que foi discutido e descrito em todo o processo, observa-se que a área tem estruturas e litologias características do ambiente. Porém, a geologia associada aos dados geofísicos, possuía uma escala regional, logo propõe-se um mapeamento geológico de detalhe, com maior amostragem de rochas, informações de testemunhos de sondagens ou outros métodos geofísicos, auxiliar nesse maior detalhamento da região, alcançando assim maior sucesso na descrição da área de estudo.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARYA, A. P. **Fundamentals of Nuclear Physics**. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1966. 58/82.
- BARANOV, V., 1957. **A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies**. *Geophysics*, 22, 359383.

BLAKELY, R. J., 1995. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. 1 ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 441 p.

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**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p.

BRIGGS I.C. 1974. **Machine contouring using minimum curvature**. *Geophysics*, 39:39-48.

BONGIOLO, A. B. 2011. **Contribuição ao estudo da bacia do Amazonas e seu embasamento através da magnetometria e gravimetria**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

BOYLE, R. W. **Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits**. *Developments in Economic Geology*, n.16, p. 71-78, 1982.

CALÓGERAS, P. 1938. **As Minas do Brasil e sua Legislação**. Companhia Editora Nacional. São Paulo.

CAMOZZATO, E. ; PHILIPP, R. P. ; LAUX, J. H. ; NARDI, L. V. S. ; SANDER, A.. **Magmatismo Pós-Colisional no Terreno Taquembó: geologia e geoquímica das Suítes Santo Afonso, Saibro e Vauthier e Granito Passo da Chácara, RS**. Em: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2013, Diamantina. XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica. Belo Horizonte: SBGq, v. 1, p. Submetido, 2013.

CHEMALE JR., F. (2000) **Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. In: Holz, M., De Ros, I. F. (Eds.) *geologia do Rio Grande do Sul*. CIGO-UFRGS, pp. 13-54.

CORDANI, R. **Um critério para a escolha da direção das linhas de voo em aeromagnetometria no Brasil**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA

SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 9. 2005, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2005.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto aerogeofísico Escudo do Rio Grande do Sul**: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Vol. I, Texto técnico. Lasa Prospecções S/A, 260p. 2010.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors**. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, Austrália, v.17, n. 2, p. 187-200. 1997.

FERREIRA, F. J. F & SOUZA, J. L. 2002. **Gamaespectrometria - Fundamentos, Geoquímica e Distribuição dos Radioelementos em Rochas e Solos**. LPGA, Dep. Geologia UFPR. Curitiba, 72 p.

FONSECA, D. A. C. **Modelagem e Avaliação de Dados Geofísicos e Geoquímicos Aplicadas na Pesquisa de Metais Básicos e Ouro no Prospecto Volta Grande (Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil)**. 2002. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

FOOTE, R. S.; 1969. **Improvement in airborne gamma radiation data analyses for anomalous radiation changes**. In: SIMPÓSIO SOBRE O USO DE TÉCNICAS NUCLEARES NA PROSPECÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS MINERAIS. International Atomic Energy Meeting, Buenos Aires.

GASTAL, M. C. P. **Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência**. Parte 1: geologia, geofísica e geocronologia ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$). Revista Brasileira de Geociências, Aceito, v. 36, p. 109-124, 2006.

GASTAL, M. C. **Alojamento do granito Lavras e a mineralização aurífera durante evolução de centro vulcano-plutônico pós-colisional, oeste do Escudo Sul-**

riograndense: Dados geofísicos e estruturais. *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, p. 217-241, 2015.

GEOSOFT. **Sistema de Processamento, Análise e Visualização para a inversão 3D de Dados de Campos Potenciais.** USER GUIDE, 2010.

GEOSOFT. **Software de Mapeamento e Processamento de Dados Geocientíficos.** 2013.

GUNN, P.J.; DENTITH, M.C. 1997. **Magnetic responses associated with mineral deposit.** *Journal of Australian Geology & Geophysics – AGSO*, **17(2):**145-158.

HANSEN DA. 1975. *Geological Applications Manual for Portable Gamma Ray Spectrometers.* Toronto, Exploranium G. S. Limited, 87p.

HARTMANN, L.A.; NARDI, L.V.S. ; FORMOSO, M.L.L. ; REMUS, M.V.D.; LIMA, E.F.; MEXIAS, A.S. 1999. **Magmatism and metallogeny in the crustal evolution of Rio Grande do Sul shield, Brazil.** *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, Porto Alegre, v. 26, n. 2, p. 46-63.

HARTMANN, L. A.; LEITE, J. A. D.; SILVA, L. C.; REMUS, M. V. D.; MCNAUGHTON, N. J.; GROVES, D. I.; FLETCHER, I. R.; SANTOS, J. O. S. & VASCONCELLOS, M. A. Z. 2000. **Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil.** *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-844.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE Jr., F.; PHILIPP, R. P. 2007. **Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano.** In: IANUZZI, R.; FRANTZ, J.C. (Org.). in: **50 anos de Geologia.** 1 ed. Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS: Editora Comunicação e Identidade, CIGO/UFRGS. v. 1, p. 97-123.

IAEA; 1991. **Airborne gamma ray spectrometer surveying.** Viena: International Atomic Energy Agency. 97 p. (Technical Report Serie, nº 323).

IGLESIAS, F. M. C. **Análise integrada de dados geológicos e estruturais para a prospecção de ouro na região de Torquato Severo (RS)**. 2000, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2000.

JACKSON, V.N.; RAMOS, V.A; TERRY, S.A.; ZUZEK, A.B. 1973. **Projeto aerogeofísico Camaquã, Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Texas Instruments, DNPM/CPRM/CENEN. 208p. (Inédito).

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.; 2002. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Blackwell Science Ltd. 3 edição. ISBN 0-632-04929-4. 281 p.

LANGMUIR, D., HERMAN, J. S. 1980. **The mobility of thorium in natural waters at low temperatures**. Geochim. Cosmoch. Acta. 44:1753-1766.

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge : Cambridge University Press, 2007..

MINTY, B. R. S. **Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry**. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.39-50, 1997.

MINTY, B. R. S; LUYENDYK, A. P. J.; PRODIE, R. C. **Calibration and data procesising for airborne gamma-ray spectrometry**. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.51-62, 1997.

NABIGHIAN MN. 1972. **The analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation**. Geophysics, 37(3): 507-517.

OLDENBURG, W. D. **Inversion of geophysical data over a copper gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan**. Geofísica, VOL. 62, NO. 5 (Setembro-Outubro 1997); P. 1419–1431, 15 FIGS.

OLIVEIRA, R. G. 2008. **Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 411 p.

PEREIRA, A. M. ; MOREIRA, C. A. . **Prospecção magnetométrica em intrusiva básica com indícios de mineralização aurífera na região de São Sepé - RS**. 2014

RAMOS, C. R. **Geologia da associação metamáfica-ultramáfica da região de Arroio Grande, sudeste do Escudo Sul-rio-grandense**. 2011, 41 (1): 25-38, jan./abr. Pós Graduação Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil Rudnick & Gao 2004, Ulbrich et al. 2009.

RUDNICK, R., GAO, S. 2004. **Composition of the continental crust**. In: Holland H.D., Turekian N.N. eds. Treatise on geochemistry. Oxford: Elsevier Per Oxford: Elsevier Pergamon. 3:1-64.

SHIVES, R. B. K., Charbonneau B.W., Ford K.L. 2000. **The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – Recognition of alteration related to mineralization**. Geophysics, 65:2001-2011.

SPECTOR, A. and GRANT, F.S. (1970) **Statistical model for the interpreting of aeromagnetic data**. Geophysics, v. 35, pp. 293–302.

TALLARICO, F. H. B, COIMBRA, C. R & COSTA, C. H. C. 2000. **The Serra Leste sediment-hosted Au-(Pd-Pt) mineralization, Carajás Province**. Rev. Bras. Geoc., 30(2): 226-229.

TAUXE. L. 2005 **Lectures in Paleomagnetism**.
<http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

ULBRICH, H. H. G. J.; VLACH, S. R. F.; JANASI, V. A. **O mapeamento faciológico em rochas ígneas plutônicas**. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 163-172, 2001.

VASCONCELLOS RM, METELO MJ, MOTTA AC & GOMES RD. 1994. **Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil**. Rio de Janeiro, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 165p.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. **Application of gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and geomorphology**. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 17, n.2, p.201-216. 1997.

APÊNDICE A

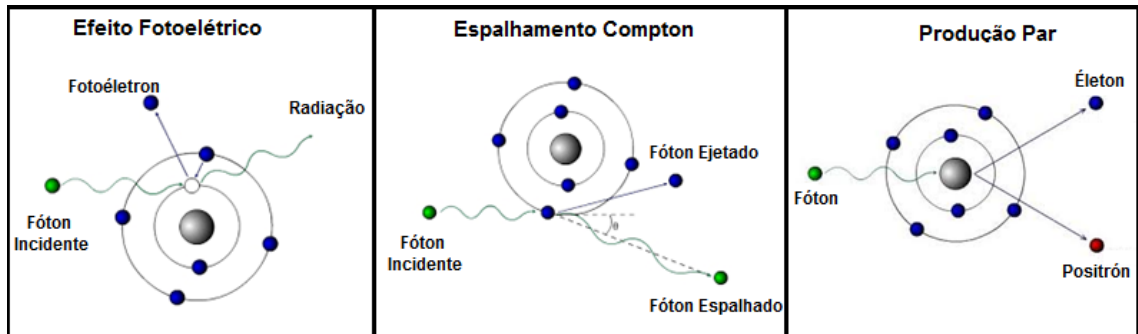
Processos de Interação da Radiação Gama com a Matéria

Efeito Fotoelétrico - Em um ambiente de baixos níveis de energia, a absorção de um fóton gama fornece energia para o elétron ser expelido pelo átomo.

Espalhamento Compton - Em um ambiente de energia moderada, ocorre a perda da parte da energia de um fóton incidente para um elétron, que é espalhado a um ângulo relacionado com a sua direção inicial. A perda de energia do raio gama é transferida, por energia cinética, para um elétron.

Produção de Par - Ocorre em ambientes de alta energia, com materiais de número atômico elevado, pois um fóton incidente é completamente absorvido, resultando na criação de um par de elétron-pósitron no campo eletrostático de um núcleo, com uma energia total equivalente àquela do fóton inicial. Este processo não ocorre necessariamente na eletrosfera, pois também pode ocorrer sem átomo, no vácuo.

Figura 40 – Representação dos três processos de interação da radiação com a matéria.



Fonte: site <http://www.oocities.org/tomografiademadeira/interacao.html>. Acessado: 07 de Julho de 2016

APÊNDICE B

Principais Características dos Elementos Radiométricos

Potássio (K)

O Potássio aparece com abundância média de 1,50% (1,81% K₂O) ao longo da crosta continental, concentrando-se em maior quantidade na parte superior (2,32% K, 2,80% K₂O) do que na inferior (0,51% K, 0,61% K₂O) (Rudnick & Gao 2004, Ulbrich et al. 2009). O Potássio tem ocorrência em feldspatos potássicos, sendo que seus polimorfos são ortoclásio e microclínio, além de outros argilominerais devido a alterações hidrotermais. O Potássio é observado apenas em teores muito baixos da crosta continental, como nos piroxênios ou anfibólios mais comuns (Dickson & Scott 1997). Este elemento pode ser encontrado em alto teor em rochas ígneas félsicas, como granitóides, em baixo teor em rochas metamórficas micáceas, feldspáticas e quartzo-feldspáticas, como filitos, xistos e gnaisses. Ele também pode ser encontrado em rochas sedimentares, como folhelhos e argilitos com baixo e moderado teor. Este elemento evidencia alta mobilidade durante o intemperismo e em ambientes de alteração hidrotermal, principalmente ambientes de clima tropical a subtropical (Wilford et al. 1997).

Tório (Th)

O tório é um elemento que apresenta valor médio de 5,6 ppm ao longo da crosta continental, podendo atingir teor de até 10,5 ppm na parte superior enquanto que na parte inferior, bem mais exaurida, a concentração de Tório é de aproximadamente 1,2 ppm (Rudnick & Gao 2004). Este pode ser encontrado em minerais acessórios de variadas rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas (Boyle, 1982). A solubilidade dos complexos de Tório geralmente é baixa, exceto em caso de soluções ácidas. O Tório pode estar presente nos seguintes minerais: alanita, monazita, xenotima e zircão em níveis superiores a 1000 ppm, ou como vestígios em outros minerais formadores de rochas (Dickson & Scott 1997). Este apresenta a menor mobilidade geoquímica dos três elementos discutidos. Segundo Dickson & Scott (1997), a maioria dos minerais com alto teor de Th, como a monazita e o zircão, é estável durante o intemperismo e pode se acumular em depósitos de areia contendo minerais pesados. O Tório livre, devido à quebra do mineral durante o intemperismo, pode ser retido nos óxidos-hidróxidos de Fe e Ti ou mesmo em argilitos. Assim como o Urânio, o Tório também pode se fixar em argilas coloidais e óxidos de ferro.

Urânio (U)

Na crosta continental o Urânio apresenta um valor médio de 1,3 ppm, sendo sua concentração maior na parte superior da crosta (2,7 ppm) do que na inferior (0,2 ppm) (Rudnick & Gao, 2004). Este elemento é menos móvel do que o Potássio. Uma vez retirado da sua respectiva rocha fonte durante o intemperismo, ele é facilmente absorvidos por argilominerais e co-precipitado com óxidos de ferro nos solos, tendendo assim a se concentrar em ambientes do que o Potássio (Wilford et al. 1997). O Urânio pode formar minerais solúveis, diminuindo assim a concentração deste. Entretanto, minerais insolúveis desse elemento tendem a não migrar, exceto no caso de serem transportados. Os minérios de urânio estão presentes em pegmatitos, sienitos, carbonatitos, granitos, gnaisses e alguns folhelhos (Gunn et al., 1997). Nos sedimentos arenosos, o teor de Urânio geralmente é menor que 1 ppm devido à facilidade de lixiviação desse elemento. Porém, quando os sedimentos são originados a partir da erosão de rochas ígneas com minerais resistentes de Tório e Urânio, estes podem formar rochas com concentrações anômalas de ambos os elementos, como é o caso de depósitos do tipo aluvionar ou litorâneos (Vasconcellos et al, 1994).