



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DEPÓSITOS DE GRAFITA NA REGIÃO DE MACARANI, NO ESTADO DA BAHIA**

Niterói, RJ
2019

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DEPÓSITOS DE GRAFITA NA REGIÃO DE MACARANI, NO ESTADO DA BAHIA**

Projeto Final apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte da Disciplina de Projeto Final II e requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador:

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (UFF/GGO)

Coorientadores:

M.Sc. Telma Aisengart (Seequent)

M.Sc. Ives Antonio de Almeida Garrido (CBPM)

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S964i Susin, Victória Carolina Figueira
Interpretação de Dados Aerogeofísicos para
Identificação de Depósitos de Grafita na Região de
Macarani, no Estado da Bahia / Victória Carolina Figueira
Susin ; Antonio Fernando Menezes Freire, orientador ; Telma
Aisengart, coorientadora. Niterói, 2019.
91 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica)-
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências,
Niterói, 2019.

1. Pesquisa Mineral. 2. Grafita. 3. Aeromagnetometria. 4.
Aerogamaespectrometria. 5. Produção intelectual. I. Freire,
Antonio Fernando Menezes, orientador. II. Aisengart, Telma,
coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto
de Geociências. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS PARA IDENTIFICAÇÃO
DEPÓSITOS DE GRAFITA NA REGIÃO DE MACARANI, NO ESTADO DA
BAHIA**

Projeto Final apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte da Disciplina de Projeto Final II e requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovada em ___ de _____ de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Rodrigo Bijani Santos
Universidade Federal Fluminense

M.Sc. Telma Aisengart (Seequent)

Niterói, RJ
2019

*À minha família,
pelo suporte e incentivo sempre.*

Agradecimentos

“...e mesmo que eu ande pelo vale escuro, nada temerei, pois comigo estará”. Começar os agradecimentos assim me parece a forma mais correta, afinal, sem a fé não teria chegado tão longe. Agradeço à Deus por ter nos ensinado a crer e a permitir que essa força nos guie pelos caminhos da vida.

Aos meus pais, Sandra e Ricardo, imensa gratidão por todo amor e suporte, pela atenção, conversas e consolo quando as coisas não davam certo. Por serem os primeiros incentivadores dessa ideia maluca de me graduar em Geofísica, e a acharem maneiríssimo mesmo não entendendo exatamente o que era.

Agradeço à minha avó, Amparo, por realmente me amparar nas idas e vindas da faculdade, por ter sempre uma comidinha gostosa pra alegrar o dia e tornar as coisas mais leves, e ao meu irmão, Geovani, por compartilhar comigo o amor pelo nosso planeta e pelos processos que nele se ordenam, por se entusiasmar com esses temas, pelas conversas doidas e aventuras.

Ao meu amor, Daniel, agradeço todo o carinho, confiança e paciência. Por me mostrar muitas vezes o que eu não conseguia ver, por me acalmar quando precisei, por estar sempre presente e por me fazer feliz ao longo desses anos. Aos meus sogros, Solange e Carlos, pelo bom humor e cuidado, pelas viagens inesperadas e discussões enriquecedoras.

Um muito muito obrigado à minha tia-avó Maria do Carmo, ou pra todos, Carminha, por me acolher e receber em Niterói por esses períodos mais apertados da faculdade, e por ser sempre tão querida.

Agradeço aos meus amigos de longa data, e aos mais novos também, pelas inúmeras risadas, pela leveza e pelos finais de semana de estudo roubados, por uma ótima causa. Especialmente à Jeniffer, Luana e ao Moreno. À Jeni, por estar sempre comigo nesses anos de graduação, e por ser uma amiga tão querida e incentivadora. Por me inspirar a ser uma pessoa dedicada e uma profissional de garra. À Luana e ao Moreno pelas inúmeras vezes que me salvaram nesse processo interminável de escrever a monografia, por todos os

conselhos e ensinamentos, por tornarem os dias no estágio mais divertidos e agregadores.

Aos meus professores, à minha supervisora na Geosoft e coorientadora, Telma Aisengart, e ao meu orientador, Antônio Fernando Menezes Freire, que sem os quais esse aglomerado de texto não estaria aqui e não faria o menor sentido, muito obrigado! Por me auxiliarem no processo de aprendizagem, pela paciência e orientação. Obrigada por acreditarem em mim e por todas as oportunidades. Agradeço também à Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) e à Seequent-Geosoft, respectivamente pela liberação dos dados e pela permissão de uso do software Oasis Montaj.

Sou muito grata pela oportunidade de me formar em uma universidade pública de qualidade, ter concluído meus 5 anos de estudo e essa fase de graduação, para agora, começar a trilhar um novo caminho como Geofísica.

“Como castelos nascem dos sonhos, pra no real achar seu lugar...”

(Oswaldo Montenegro)

RESUMO

A grafita natural é um bem mineral amplamente distribuído na natureza em diversos tipos de rochas. Atualmente, sabe-se que a mesma é a principal fonte para a produção de grafeno, nano material com crescente potencial na participação de novas tecnologias, e também para a fabricação de diversos outros materiais essenciais à indústria. Neste sentido, o intuito deste trabalho foi estudar as respostas geofísicas dos aerolevantamentos de magnetometria e gamaespectrometria, calibradas através de dados geológicos, visando definir potenciais depósitos de grafita, facilitando sua prospecção e exploração. O objetivo foi, através do processamento e filtragem dos dados fornecidos sobre uma área de interesse para exploração de grafita no estado da Bahia, na região da cidade de Macarani, gerar mapas e interpretações através dos dados, correlacionando-os com as informações geológicas disponíveis. Ao final deste trabalho foi realizado um fluxo exploratório composto por uma integração de dados aerogeofísicos, de sensoriamento remoto e geológicos regionais, que propiciaram uma correlação de dados de origens diversas. Do ponto de vista exploratório, em caráter regional, foi possível concluir que as melhores áreas da região de Macarani para a ocorrência de grafita são aquelas onde ocorrem baixos valores aeromagnetométricos e altos valores de urânio e tório, tendo uma maior razão tório/urânio, em condições de relevos mais elevados. Este conhecimento aumenta a previsibilidade de possíveis ocorrências, otimizando custos e conferindo maior robustez aos processos exploratórios.

PALAVRAS-CHAVE: Grafita; Pesquisa Mineral; Macarani; Aeromagnetometria; Aerogamaespectrometria.

ABSTRACT

Natural graphite is a mineral asset widely distributed in nature in various types of rocks. Currently, it is known that graphite is the main source for the production of graphene, nanomaterial with increasing potential in the participation of new technologies, as well as for the manufacture of various other materials essential for the industry. In this sense, the purpose of this work is to study geophysical responses of magnetometry and gammaespectrometry airborne surveys, calibrated through geological data, aiming to define potential graphite deposits, increasing their prospecting and exploration. The goal of this study was, through processing and filtering of the provided data about an area of interest for graphite exploration in the state of Bahia, in the region of Macarani, to generate maps and interpretations, correlating them with the available geological information. At the end of this work, an exploratory flow composed by the integration of aerogeophysical, remote sensing and regional geological data was performed, which provided a correlation of different sources data. From the exploratory point of view, on a regional basis, it was possible to conclude that the best areas in Macarani region for graphite occurrence are those where low magnetic values and high uranium and thorium values occur, with a higher Th/U ratio, in higher topography values conditions. This knowledge increases the predictability of possible occurrences, optimizing costs and giving greater robustness to the exploratory processes.

KEYWORDS: Graphite; Mineral Exploration; Macarani; Aeromagnetometry; Aerogamaspectrometry.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	2
1.1 APRESENTAÇÃO	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 ÁREA DE ESTUDO.....	4
II. CONTEXTO GEOLÓGICO	6
2.1 ORÓGENO ARAÇUAÍ	6
2.2 PROVÍNCIA GRAFÍTICA BAHIA-MINAS.....	7
2.3 FORMAÇÃO RIBEIRÃO DA FOLHA.....	9
Figura 2.4: Seção estratigráfica da Formação Ribeirão da Folha. Fonte: Queiroga, et al., 2006.	12
III. A GRAFITA	13
3.1 APRESENTAÇÃO	13
3.2 OCORRÊNCIA.....	14
3.3 TIPOS DE DEPÓSITOS DE GRAFITA.....	16
3.4 GRAFITA NA PROVÍNCIA GRAFÍTICA BAHIA-MINAS.....	17
IV. MATERIAIS	19
4.1 APRESENTAÇÃO	19
4.2 PROJETO AEROGEOFÍSICO CÂNDIDO SALES-MASCOTE	19
4.3 SOFTWARE	20
V. MÉTODOS	21
5.1 APRESENTAÇÃO	21
5.2 MÉTODO AEROMAGNETOMÉTRICO.....	22
5.3 PROCESSAMENTO DE DADOS DE AEROMAGNETOMETRIA	24
5.3.1 Interpolação dos Dados Magnéticos	25
5.3.2 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	27
5.3.3 Primeira Derivada Vertical	28
5.3.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou <i>Tilt Derivative</i> (TDR).....	28
5.3.5 Diferença da Continuação Ascendente.....	29

5.4 MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO	30
5.5 PROCESSAMENTO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA.....	31
5.5.1 Interpolação dos Dados Gamaespectrométricos.....	32
5.5.2 Mapas Ternários	32
5.6 SELF-ORGANIZING MAPS (SOM)	33
VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
6.1 APRESENTAÇÃO	35
6.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS.....	35
6.2.1 Campo Magnético Anômalo	36
6.2.2 Interpretação das Estruturas Magnéticas	40
6.2.3 Caracterização dos Domínios Magnéticos.....	44
6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS	53
6.3.1 Modelo Digital de Elevação de Terreno	54
6.3.2 Potássio	54
6.3.3 Urânio	56
6.3.4 Tório.....	57
6.3.5 Mapa Ternário	58
6.3.6 Razões Th/K, Th/U e U/K	61
6.4 CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA.....	64
6.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS.....	65
VII. CONCLUSÕES	70
VIII. BIBLIOGRAFIA.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Físicas da Grafita. Fonte: Autora.....	21
--	----

LISTA DE ABREVIATÖES

ASA	Amplitude do Sinal Analítico
BMU	Best Matching Unit
C	Carbono
CBPM	Companhia Baiana de Pesquisa Mineral
CMA	Campo Magnético Anômalo
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Dz	Primeira Derivada Vertical
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
ISA	Inclinação do Sinal Analítico
K	Potássio
MDT	Modelo Digital de Elevação de Terreno
N	Norte
NE	Nordeste
nT	Nano Tesla
NW	Noroeste
ppm	Partes por milhão
RGB	Padrão vermelho (<i>Red</i>), verde (<i>Green</i>) e azul (<i>Blue</i>)
S	Sul
SE	Sudeste
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOM	Self Organizing Maps
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SW	Sudoeste
Th	Tório
TMI	<i>Total Magnetic Field</i>
U	Urânio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização do estado da Bahia com a área de Macarani com dados de SRTM.	5
Figura 2.1: Mapa geotectônico do Orógeno Araçuaí, com a localização da Província Grafitica Bahia-Minas (Pedrosa-Soares et al., 2006).	7
Figura 2.2: Unidades estratigráficas do Orógeno Araçuaí, com a localização da Província Grafitica Bahia-Minas (Pedrosa-Soares et al., 2001).	8
Figura 2.3 (a): Geologia da região de Macarani. Modificado de Mapa Geológico e de Recursos Minerais – Projeto Itapetinga Canavieiras. CPRM e CBPM (2006).	10
Figura 2.3 (b): Legenda da figura 2.3 (a).	11
Figura 2.4: Seção estratigráfica da Formação Ribeirão da Folha. Fonte: Queiroga, et al., 2006.	12
Figura 3.1: Diagrama mostrando o arranjo dos átomos de carbono na grafita (modificado de Kraus et al., 1989).	13
Figura 5.1: Fluxo de processamento simplificado aplicado aos dados de magnetometria.	25
Figura 5.2: Comparação entre os métodos de interpolação de Mínima Curvatura (à esquerda) e Bidirecional (à direita).	27
Figura 5.3: Fluxograma do processamento dos dados de gamaespectrometria.	32
Figura 6.1: Mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) da área de estudo. Fonte: Autora.	37
Figura 6.2: Mapa da Primeira Derivada Vertical (Dz). Fonte: Autora.	39
Figura 6.3: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ISA). Fonte: Autora.	41
Figura 6.4: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico somado ao mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ASA + ISA). Fonte: Autora.	42
Figura 6.5: Mapa de estruturas magnéticas lineares interpretadas a partir das imagens magnéticas. Fonte: Autora.	43
Figura 6.6: Espectro de potência ponderado radialmente para o CMA. Fonte: Autora.	46
Figura 6.7: Aplicação do filtro passa-baixa. Fonte: Autora.	46
Figura 6.8: Mapa regional e domínios magnéticos interpretados a partir das fontes profundas. Fonte: Autora.	47
Figura 6.9: Aplicação do filtro passa-banda. Fonte: Autora.	48
Figura 6.10: Mapa com frequências intermediárias e domínios magnéticos interpretados. Fonte: Autora.	50
Figura 6.11: Aplicação do filtro passa-alta. Fonte: Autora.	51
Figura 6.12: Mapa residual e domínios magnéticos interpretados a partir de fontes rasas. Fonte: Autora.	52
Figura 6.13: Comparação dos mapas residual e diferença da continuação ascendente com ocorrências de grafita. Fonte: Autora.	53
Figura 6.14: Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDT). Fonte: Autora.	55
Figura 6.15 (a): Canal de Potássio (^{40}K) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.	56
Figura 6.16: Canal de Urânio (^{238}U) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.	58
Figura 6.17: Canal de Tório (^{232}Th) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.	59

Figura 6.18: Mapa ternário com composição RGB. Fonte: Autora.	60
Figura 6.19 (a): Mapas com a razão Th/K e sua representação com a drenagem, área de interesse e ocorrências de grafita. Fonte: Autora.....	62
Figura 6.20: Mapas com a razão Th/U e sua representação com a drenagem, área de interesse e ocorrências de grafita. Fonte: Autora.	63
Figura 6.21: Comparação da topografia (à esquerda) com a interpretação das intercalações de Tório e Urânio (à direita) com as ocorrências de grafita. Fonte: Autora.....	63
Figura 6.22: Mapas produzidos através da classificação automática SOM.	65
Figura 6.23: Ocorrências de grafita cadastradas localizadas nas regiões com maiores concentrações de tório, alinhadas em formas curvilíneas na região SW do mapa. Fonte: Autora.	68

I. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Este trabalho tem por objetivo reunir informações sobre o mineral grafita nas áreas definidas pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), no estado da Bahia, dando enfoque aos métodos geofísicos. A partir desta pesquisa, foram estudadas as respostas geofísicas da grafita, na intenção de entender estas ocorrências minerais e auxiliar em sua prospecção, aumentando a previsibilidade, otimizando custos e conferindo maior robustez aos processos exploratórios.

A importância industrial da grafita tem aumentado nos últimos anos em função do aumento de sua demanda, sem o correspondente aumento de reservas conhecidas. Esse mineral industrial tornou-se estratégico e os preços dos concentrados de grafita em flocos (*flakes*) atingem mais de mil dólares por tonelada, dependendo do teor de carbono e do grau de cristalinidade (Brito, H. *et al.*, 2017).

No sul da Bahia, região da área de estudo, gnaisses de diversas origens do Complexo Jequitinhonha e Grupo Macaúbas são muito deformados por processos tectônicos, tendo permitido, em última análise, mineralizações economicamente relevantes de grafita cristalina.

As propriedades físicas e químicas da grafita são únicas, particularmente da grafita cristalina, e a tornam útil para inúmeras aplicações industriais, sendo que para algumas delas, não há substitutos adequados disponíveis.

Apesar da grafita ser vastamente disseminada em muitos tipos de rochas metamórficas e ígneas, a maioria das ocorrências não têm importância econômica (Robinson Jr, *et al.*, 2017). Os depósitos significativos de grafita são encontrados em rochas sedimentares carbonáticas que foram submetidas ao metamorfismo regional ou de contato (que é o caso da região de estudo), e em veios, precipitada a partir de fluidos.

A grafita é um material de baixo custo de obtenção, com propriedades físicas como inércia química, estabilidade térmica, alta condutividade elétrica e lubrificidade. O grafeno, seu derivado, é atualmente um dos mais promissores

nano materiais em estudo, devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas e ópticas. Este é produzido a partir da grafita, que é formada por uma sucessão de camadas de grafeno. Considera-se que o mesmo constitui a base da família dos minerais de carbono, com exceção do diamante (de Jesus, *et al.*,2012).

O grafeno é um material que consiste de uma folha plana de átomos de carbono, formando uma camada monoatômica. Sua estrutura eletrônica resulta em propriedades que traduzem uma resistência mecânica maior que a do aço, mobilidade eletrônica mais elevada que a do silício, condutividade térmica mais alta que a do cobre, área superficial maior que a observada para o grafite e, ainda, um material mais leve que tantos outros (Segundo & Vilar, 2016). É um material com perspectivas de aplicação tecnológica na indústria eletrônica, já que suas propriedades de condução podem ser controladas pela ação de campos elétricos aplicados e pelo fato de ser um filme estável e com espessura de ordem atômica (Brant, 2011). Além disso, o grafeno é um material intrinsecamente bidimensional e que tem um espectro de energia peculiar, o que lhe rende lugar privilegiado na pesquisa.

Outras aplicações da grafita incluem revestimento de freios, refratários e siderurgia. Baterias, escovas para motores elétricos, materiais de fundição, células de combustível e lubrificantes são também usos da mesma. A grafita também forma compostos de intercalação com vapores de metais alcalinos (normalmente, potássio, lítio, rubídio e césio), onde os íons metálicos se encaixam entre as folhas planas de carbono da estrutura da grafita. Esses compostos têm aplicação no setor de energia e em outras tecnologias. O uso industrial e o valor comercial associado à grafita natural depende das características e cristalinidade da grafita explorada.

Observa-se, assim, a grande aplicação da grafita em diversos setores da indústria, fazendo deste um material de grande interesse. Do ponto de vista acadêmico, existe necessidade de ampliar a pesquisa sobre a mesma, a fim de aumentar o conhecimento acerca deste bem mineral e tecnológico.

Com a colaboração da CBPM na disponibilização dos dados; da empresa Seequent-Geosoft no manuseio e no processamento dos dados; e da Universidade Federal Fluminense com o conhecimento e a orientação, foi proposto o desenvolvimento deste estudo como Projeto Final em Geofísica para

o ano de 2019 e conta com observações geológicas e geofísicas sobre uma área de interesse no estado da Bahia, a região de Macarani, que serão descritas à frente.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa o desenvolvimento de pesquisa acerca das respostas geofísicas da grafita para os métodos disponíveis e a utilização da técnica de Self-Organizing Maps (SOM) no auxílio à interpretação dos dados através da associação automática de propriedades e características evidenciadas pela geofísica e pela geologia. Para esta finalidade foram gerados mapas geofísicos, objetivando e facilitando o entendimento dos resultados da resposta da grafita aos métodos magnetométrico e gamaespectrométrico.

Um dos objetivos deste estudo foi, em uma primeira fase, a organização dos dados cedidos pela CBPM sobre a área de interesse, no intuito de criar um banco de dados organizado e bem estruturado para otimizar o controle e a gestão das informações geológicas e geofísicas.

Isto contribuiu com a exploração das ocorrências, na medida em que os dados foram georreferenciados em bases de informações geográficas (SIG), tratados e filtrados com o uso do software Oasis montaj da GEOSOFT, plotados em mapas e interpretados em conjunto com a geologia da área de interesse.

1.3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no estado da Bahia, na região nordeste do Brasil. À sul do estado, identificada com o retângulo, se encontra a área de Macarani. O mapa (fig. 1.1) foi gerado a partir de dados de altimetria *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

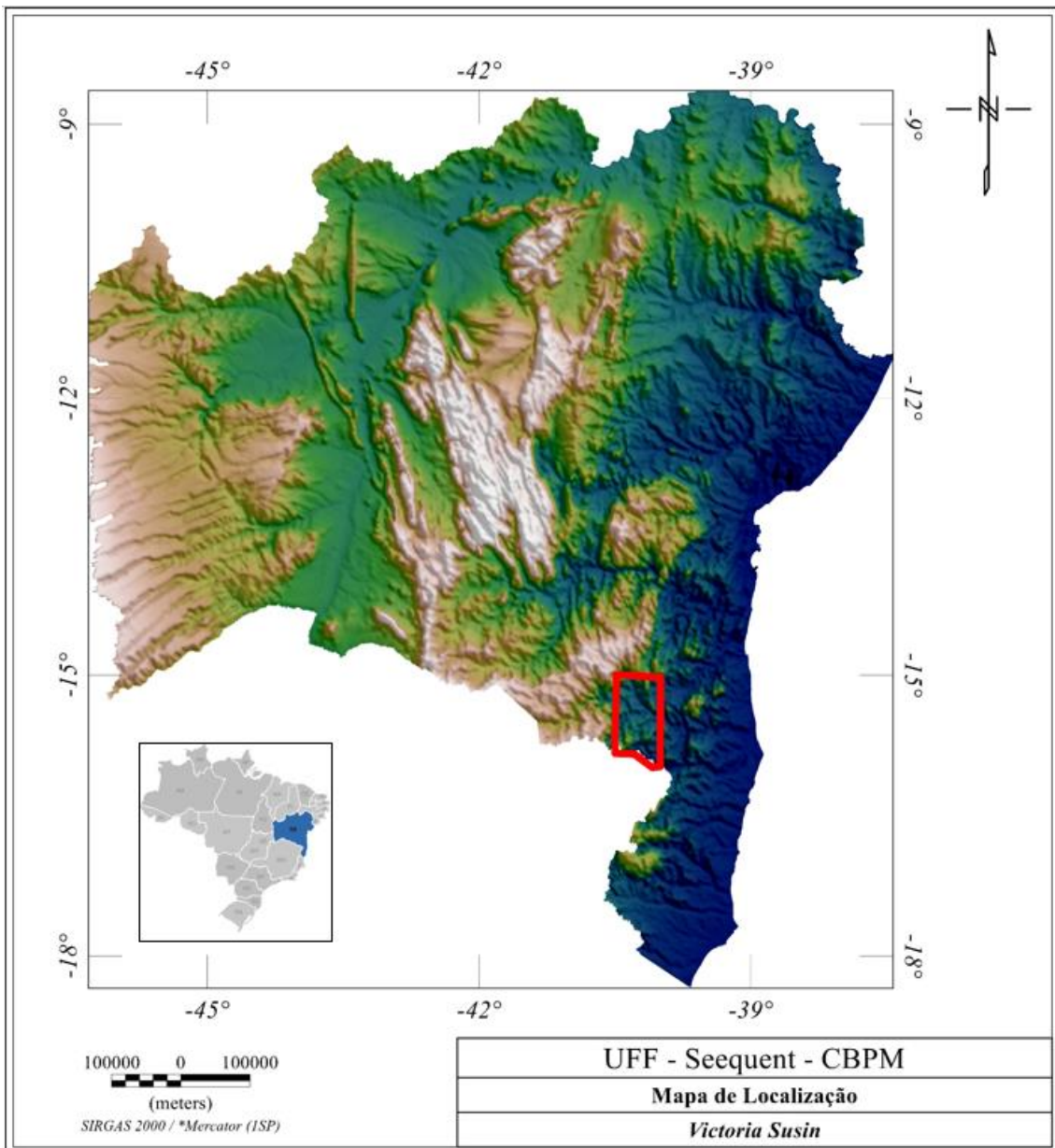


Figura 1.1: Localização do estado da Bahia com a área de Macarani com dados de SRTM.

II. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 ORÓGENO ARAÇUAÍ

A área de estudo está inserida no contexto geológico do Orógeno Araçuaí, que envolve a denominada Faixa de Dobramentos Araçuaí e data de 630 a 500 Ma. Tal como definido por Pedrosa-Soares *et al.* (2001), juntamente com a sua contraparte africana, a Faixa Congo Ocidental, estes formam um singular edifício orogênico, de natureza confinada, que se desenvolveu entre os crátons São Francisco e Congo durante a amalgamação do Gondwana Ocidental, ao final da Era Neoproterozoica.

O Orógeno Araçuaí é limitado a oeste e a norte pelo Cráton São Francisco, a leste pela margem continental brasileira e passa, a sul, ao Orógeno Ribeira. Além de rochas arqueanas, paleoproterozoicas e mesoproterozoicas, que constituem unidades infracrustais e supracrustais do embasamento, o Orógeno Araçuaí envolve uma suíte plutônica anorogênica (Suíte Salto da Divisa) e sucessões sedimentares das fases rifte e de margem passiva da bacia precursora (Grupo Macaúbas, Complexo Jequitinhonha, Grupo Rio Doce, Complexo Nova Venécia e parte do Grupo Rio Pardo), e supersuítas graníticas orogênicas.

Do ponto de vista tectônico, o Orógeno Araçuaí, em território baiano, engloba partes da Faixa de Dobramentos Araçuaí, marginal ao Cráton São Francisco (Almeida *et al.*, 1977), e do núcleo do orógeno onde estão expostas rochas de alto grau metamórfico do Complexo Jequitinhonha e suítas graníticas orogênicas.

Na Bahia se situa a porção setentrional da Faixa Araçuaí com a Saliência do Rio Pardo (a grande curva descrita pela faixa ao longo da margem sudeste do Cráton São Francisco). A saliência setentrional é o compartimento tectônico por onde os traços estruturais infletem da direção norte-sul para leste. Nesta saliência, as condições de pressão e temperatura aumentam para sul, desde a fácies xisto-verde, na zona limítrofe com o Cráton São Francisco, até a fácies anfibolito alto, no núcleo metamórfico-anatético. O ramo oriental da saliência é caracterizado por zonas oblíquas a transcorrentes, sinistrais, de direção NW-SE, com componentes de empurrão para leste (zona de cisalhamento Salto da

Divisa). A província grafítica ocupa o ramo oriental dessa saliência (Pedrosa-Soares *et al.*, 2006).

2.2 PROVÍNCIA GRAFÍTICA BAHIA-MINAS

A Província Grafítica Bahia-Minas situa-se no extremo nordeste do Orógeno Araçuai e, como mencionado acima, no ramo oriental da saliência setentrional (fig. 2.1).

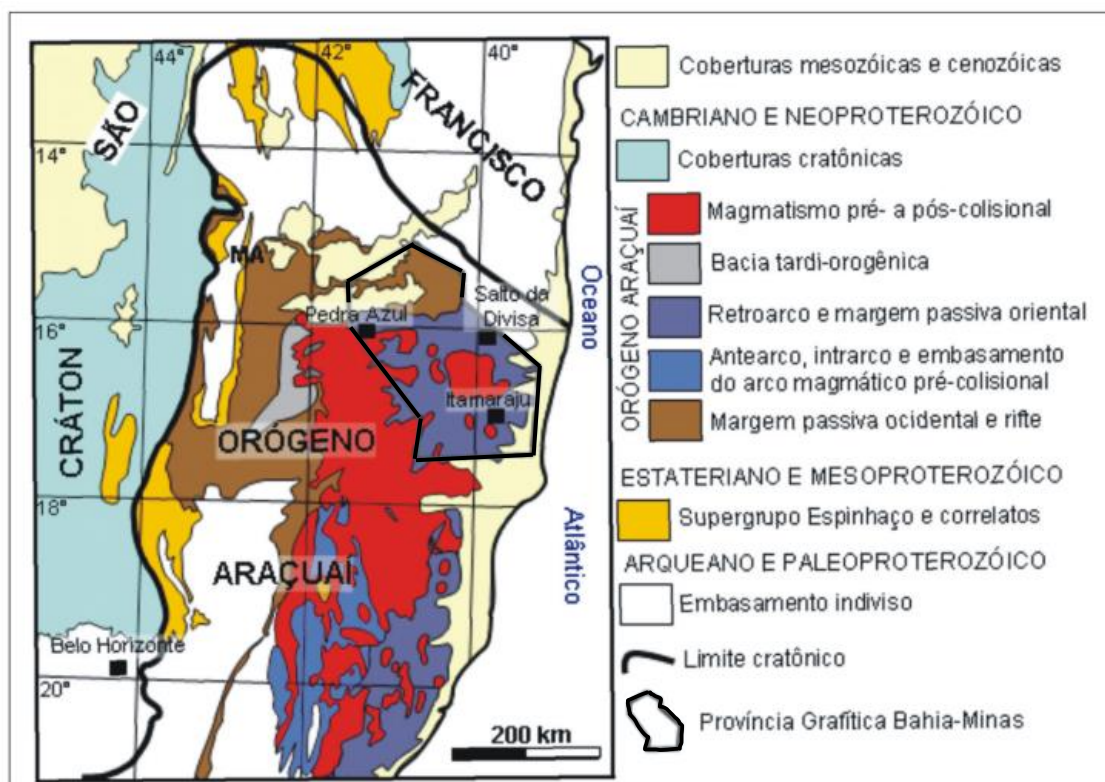


Figura 2.1: Mapa geotectônico do Orógeno Araçuai, com a localização da Província Grafítica Bahia-Minas (Pedrosa-Soares *et al.*, 2006).

A unidade estratigráfica da província de interesse para o presente trabalho está inserida no Grupo Macaúbas (fig. 2.2), onde está representado por uma sucessão rica em metadiamicritos glácio-marinhos (Formação Chapada Acauã), superposta por extensa e espessa sucessão de micaxistos, com intercalação de grafita xisto e rocha cálcio-silicática, atribuídos à Formação Ribeirão da Folha.

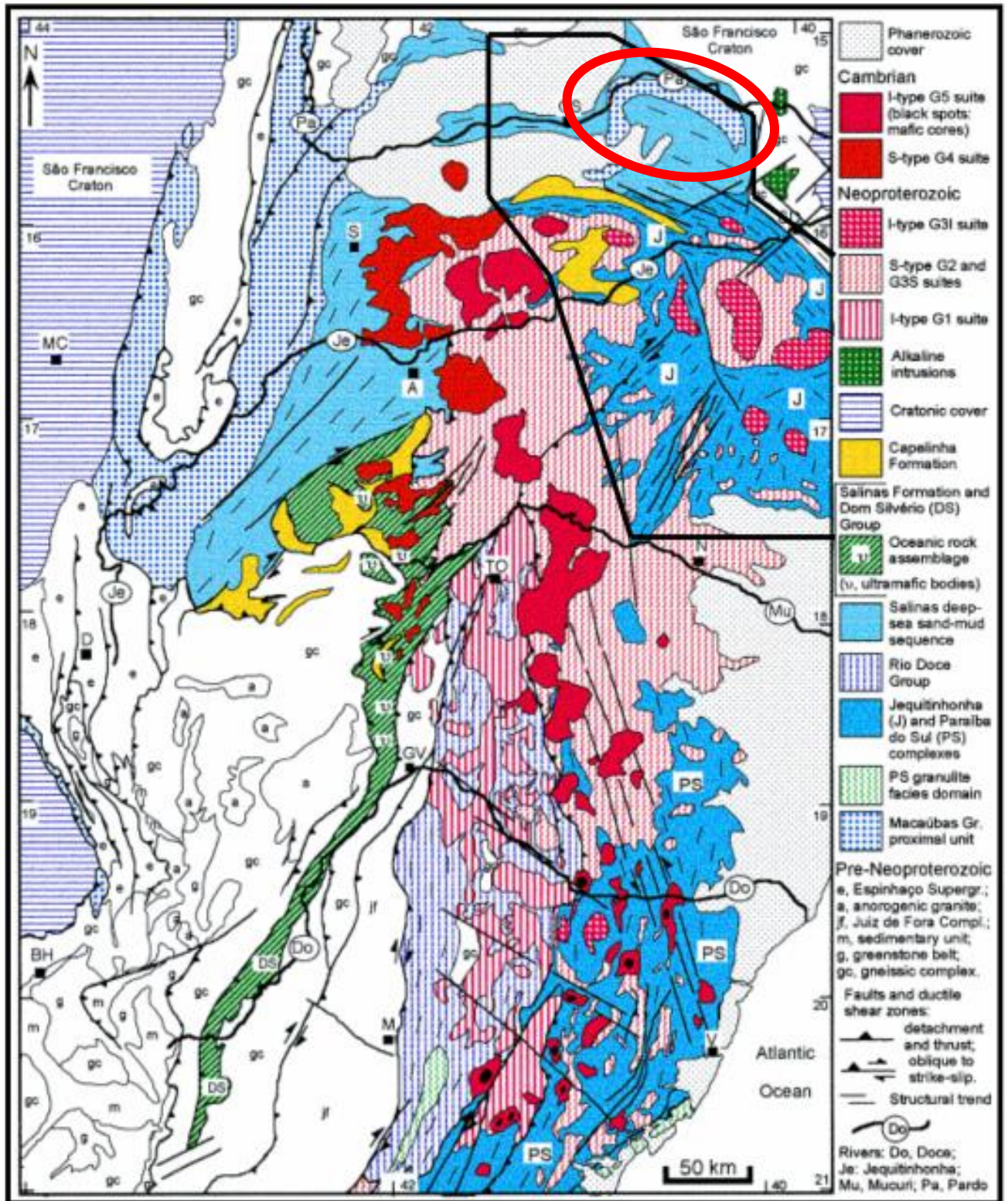


Figura 2.2: Unidades estratigráficas do Orógeno Araçuaí, com a localização da Província Gráfica Bahia-Minas (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001).

As paragêneses metamórficas dos micaxistos do Grupo Macaúbas, na saliência setentrional do orógeno, indicam que as temperaturas metamórficas aumentam no sentido sul, desde a zona da granada, no extremo norte, passando pela zona da estauroлита + cianita, na porção mediana do grupo, até a zona da sillimanita, próximo ao contato com o complexo paragnáissico (Almeida *et al.*, 1977).

2.3 FORMAÇÃO RIBEIRÃO DA FOLHA

A região próxima à cidade de Macarani (fig. 2.3), encontra-se inserida no contexto geológico da Formação Ribeirão da Folha, unidade distal do Grupo Macaúbas, que contém rochas metassedimentares.

Esta formação encaixa corpos de ortoanfibolito de granulação e composição variadas, que são representantes de magmatismo máfico oceânico (Pedrosa-Soares *et al.*, 1998). Uma variedade de ortoanfibolito de granulação fina, com sulfetos disseminados, pode ser o registro de derrames máficos da base da Formação Ribeirão da Folha. As variedades de granulação mais grossa (metagabro e metadiabásio) são interpretadas como lascas tectônicas da crosta oceânica subvulcânica a plutônica (Suita *et al.*, 2004). Rochas metaultramáficas, representantes de seção mantélica suboceânica, também ocorrem como lascas tectônicas encaixadas nas formações Ribeirão da Folha e Capelinha, a exemplo do corpo do Córrego do Rubinho (Carvalho *et al.*, 1992, Pedrosa-Soares *et al.*, 1992, Suita *et al.*, 2004).

A Formação Ribeirão da Folha inclui a unidade sedimentar de natureza oceânica, que ocorre na área de Baixa Quente-Ribeirão da Folha. Em ordem decrescente de abundância, a unidade metassedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha consiste de variedades de xisto micáceo, xisto grafitoso, metachert, formação ferrífera bandada, rocha calcissilicática paraderivada e diopsidito (fig. 2.4 - Queiroga, *et al.*, 2006).

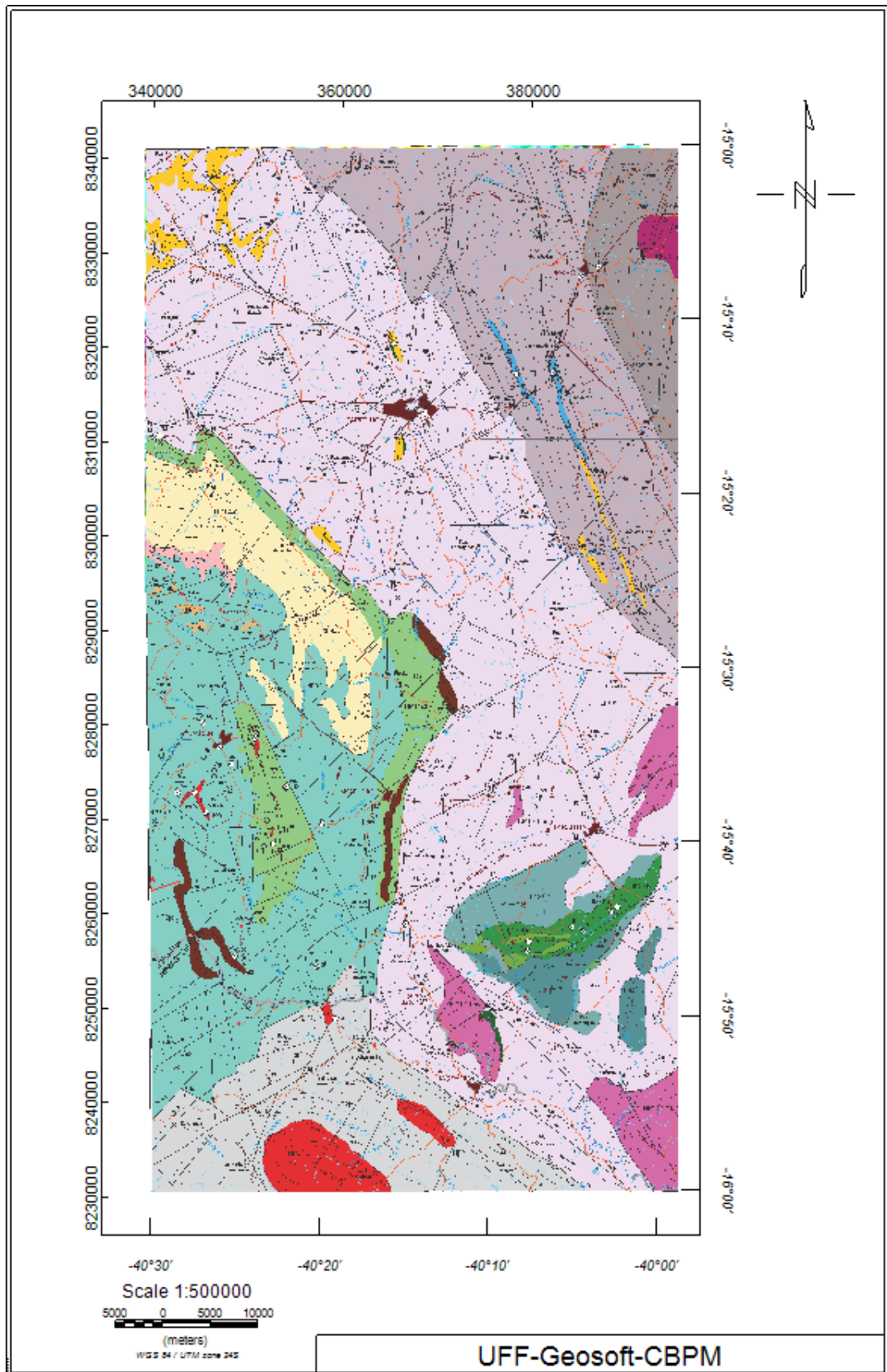


Figura 2.3 (a): Geologia da região de Macarani. Modificado de Mapa Geológico e de Recursos Minerais – Projeto Itapetinga Canavieiras. CPRM e CBPM (2006).

NEOPROTEROZÓICO / NEOPROTEROZOIC	
EDIACARANO / EDIACARAN (650 - 540 Ma)	
GRANITÓIDES TARDIA PÓS-TECTÔNICO / LATE TO POST-TECTONIC GRANITOIDS	
NP3 γ 3j	Granito, sienogranito e monzogranito porfirítico e pegmatitos graníticos. <i>Granite, syenogranite and porphyritic monzogranite and granitic pegmatites.</i>
CRIOGENIANO / CROGENIAN (850 - 650 Ma)	
SUITE INTRUSIVA ITABUNA / ITABUNA INTRUSIVE SUITE	
NP2 λItn	Aegerina - nefelina sienito. <i>Aegerine nepheline syenite.</i>
NP2 λita	Aegerina sienito. <i>Aegerine syenite.</i>
NP2 λits	Biotita sienito com nefelina e/ou sodalita e monzogranito subordinado. (720 Ma Pb-Pb) <i>Biotite syenite with nepheline and/or sodalite and subordinate monzogranite.</i>
NP2 λitf	Fenito <i>Fenit</i>
TONIANO - CRIOGENIANO / TONIAN - CROGENIAN (1000 - 650 Ma)	
COMPLEXO JEQUITINHONHA / JEQUITINHONHA COMPLEX	
NP2 jq	Biotita gnaiss kinzigítico, parcialmente migmatizado, rocha calcissilicática e quartzitos. <i>Partly migmatized kinzigite biotite gneiss, calc-silicate rock and quartzite.</i>
GRUPO MACAÚBAS / MACAÚBAS GROUP	
Formação Ribeirão de Folha / Ribeirão da Folha Formation	
NP2 rf	Granada biotita xisto bandado, sillimanita mica xisto, biotita gnaiss grafitoso e quartzito. (816 Ma Sm-Nd) <i>Banded garnet biotite schist, sillimanite micaschist, graphitic biotite gneiss and quartzite.</i>
NP2 m	Grafita - cianita xisto. <i>Graphite kyanite schist.</i>
NP2 rq	Quartzito <i>Quartzite</i>
NP12 ca	Formação Chapada Acauã: metadiamicrito com matriz xistosa, gondito, quartzito e micaxisto grafitoso e metarcóseo. <i>Chapada Acauã Formation: metadiamicrite with schistose matrix, gondite, quartzite and graphitic schist and metarkose.</i>
NP1 mci q	Unidade Campinarana-Inhobim: muscovita-biotita paragneiss com níveis de mica xisto, metarcóseo, anfíbolito, sillimanita granada xisto, xisto grafitoso e quartzito (q). <i>Campinarana - Inhobim Unit: muscovite-biotite paragneiss with micaschist, metarkose, amphibolite, sillimanite garnet schist, graphitic schist and quartzite (q).</i>

Figura 2.4 (b): Legenda da figura 2.3 (a).

As variedades de xisto micáceo são quartzo-mica xisto, xisto peraluminoso e muscovita xisto sulfetado. Estas rochas, juntamente com os xistos grafitosos, representam extensiva sedimentação de pelitos pelágicos (uma característica marcante do setor distal da Formação Ribeirão da Folha). As pequenas lentes de rocha calcissilicática quartzo-granadífera, que ocorrem intercaladas esparsamente no quartzo-mica xisto, são derivadas de mistura pelito-carbonatada (Pedrosa-Soares, 1995).

Variedades de xisto grafitoso ocorrem em camadas espessas e extensas, ou como intercalações no xisto peraluminoso e metachert. A composição mineralógica dos xistos grafitosos é muito variável, contendo grafita (25-60%), muscovita (10-30%), quartzo (5-30%), cianita (0-30%), biotita (0-15%), estauroлита (0-15%), sulfetos (especialmente pirita, traços a 10%) e outros minerais acessórios (Queiroga *et al.*, 2006). A cianita pode ser tão abundante

que a rocha ganha o nome de grafita-cianita xisto. As rochas grafitosas da área representam contribuição orgânica marinha na sedimentação pelítica, em ambiente redutor.

Os xistos grafitosos desta unidade podem constituir depósitos econômicos de grafita, a exemplo dos que são minerados na região de Maiquinique.

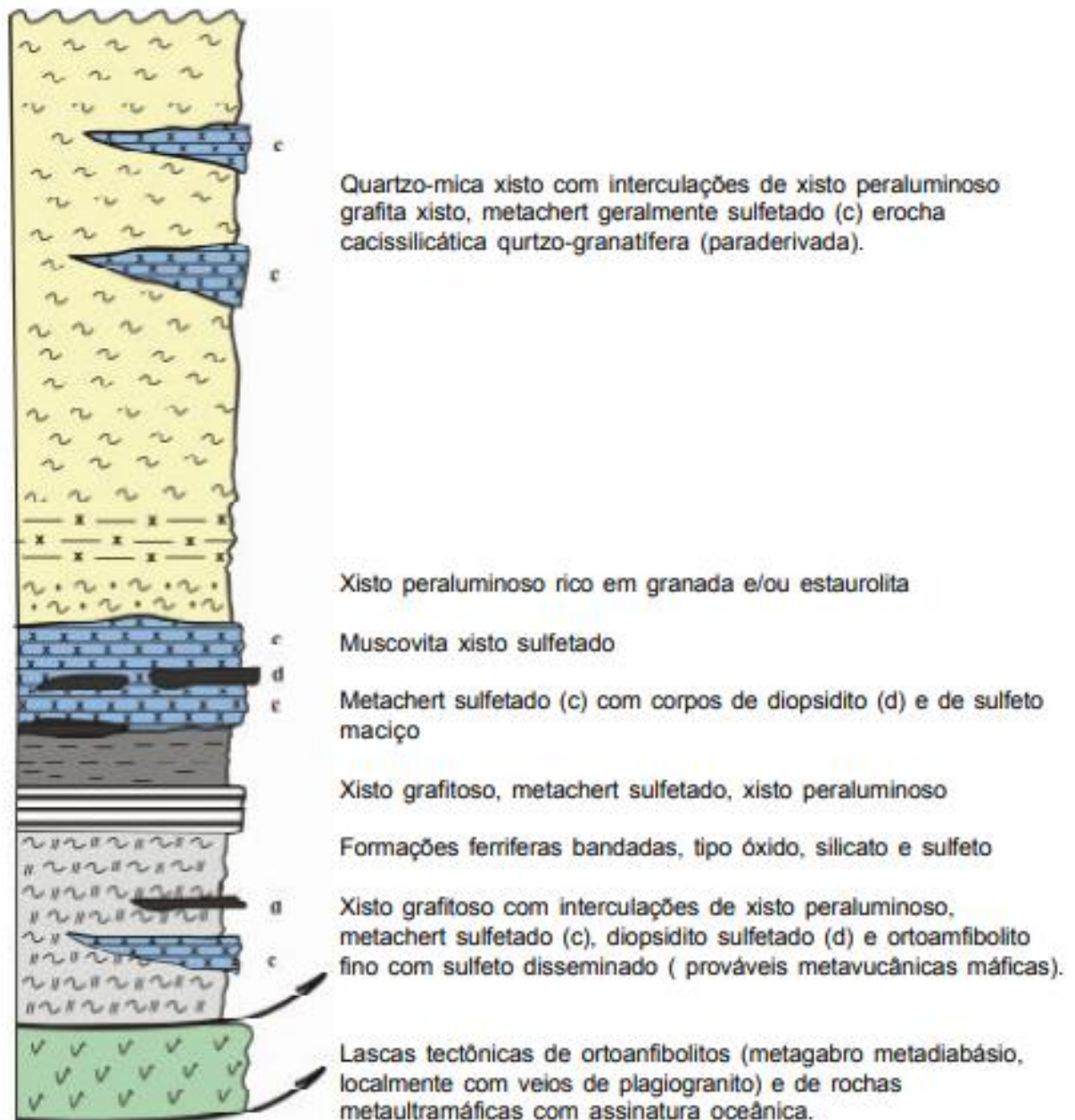


Figura 2.1: Seção estratigráfica da Formação Ribeirão da Folha. Fonte: Queiroga, et al., 2006.

III. A GRAFITA

3.1 APRESENTAÇÃO

A grafita é um elemento nativo de fórmula química C (carbono), polimórfico como o diamante. Distingue-se deste pela dureza muito baixa, cor e sistema cristalino. Os átomos de carbono na grafita estão organizados em anéis ordenados no sistema hexagonal, formando lâminas conhecidas como grafenos, que, por sua vez, estão empilhadas no sentido paralelo ao eixo cristalográfico (Scarton, 2017).

Os átomos de carbono no plano dos grafenos (ou basal) apresentam uma forte ligação covalente. As ligações entre os planos são fracas (forças de van der Waals) e podem ser mecanicamente rompidas, dando à grafita sua característica de maciez e lubricidade (fig. 3.1). Uma camada de grafeno, rompida do cristal de grafita, proporcionará um filme resistente e altamente lubrificante, que, de forma efetiva, preencherá espaços e diminuirá o atrito entre as superfícies de contato.

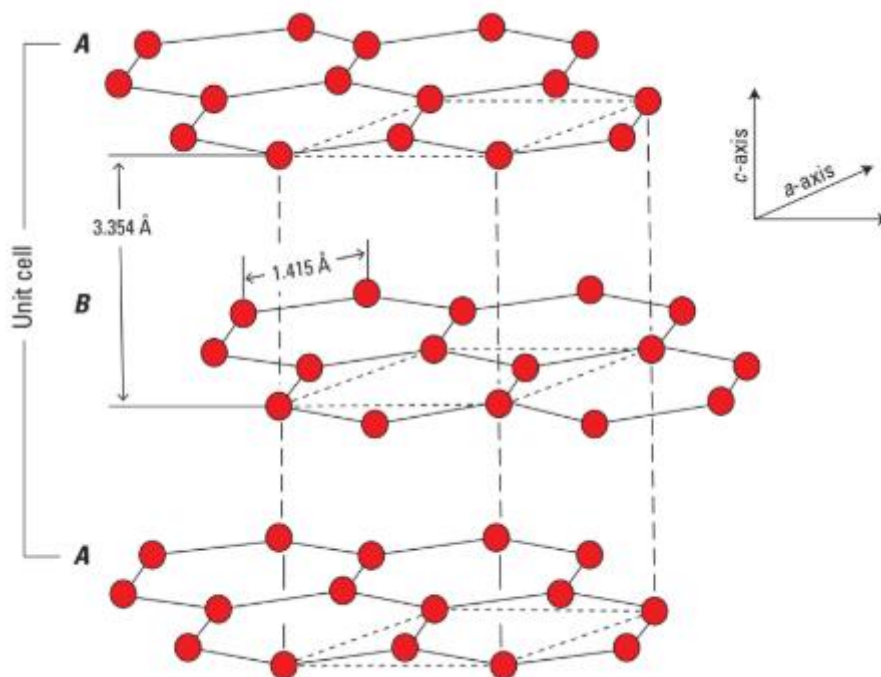


Figura 3.1: Diagrama mostrando o arranjo dos átomos de carbono na grafita (modificado de Kraus et al., 1989).

A anisotropia extrema torna a grafita um mineral de propriedades únicas, sendo responsável por uma resistividade elétrica de 5×10^3 ohm.m, no sentido perpendicular ao plano, e 5×10^{-6} ohm.m no sentido paralelo ao plano (Lobato, 2009). A grafita, portanto, é um semicondutor no sentido perpendicular ao plano e um condutor metálico no sentido paralelo ao plano. Na sua forma física, a grafita natural cristalina apresenta morfologia planar, usualmente com diâmetro muito maior que a espessura da partícula. Sua cor varia do preto ao cinza e apresenta um brilho metálico nas partículas maiores, conhecidas como *flakes*.

3.2 OCORRÊNCIA

A grafita ocorre comumente em rochas metamórficas como xistos, gnaisses e mármores. Ela pode ser encontrada na forma de palhetas lamelares (*flakes*), disseminada na rocha ou concentrada em bolsões e lentes (Figueiredo, 2006). O termo *flake* é utilizado em referência ao hábito em forma de palheta ou lamela.

A grafita também ocorre em veios hidrotermais, associada com quartzo, biotita, feldspatos, turmalina, apatita, pirita e titanita. Nestes veios, a grafita se cristaliza a partir de carbono hidrotermal derivado das rochas adjacentes, introduzido durante o metamorfismo regional.

A grafita em *flakes*, como o próprio nome indica, tem a morfologia de flocos. Os ambientes geológicos típicos incluem os relacionados ao metamorfismo de contato e o metamorfismo regional, associados a depósitos de calcários ou argilas, ricos em material orgânico. Os flocos podem ocorrer segundo uma distribuição homogênea em todo o corpo do minério ou concentrados em lentes na forma de pacotes. A concentração de carbono no minério pode variar entre 5 e 40%. No entanto, esse teor pode ainda variar o suficiente para, meramente, colorir a rocha, como acontece com os veios existentes nos mármores. As impurezas são, usualmente, minerais comuns de rochas metassedimentares, tais como: quartzo, feldspato, mica, anfibólio e granada. Todos possuem facilidade de remoção, desde que não seja necessária uma moagem muito fina do minério. Lentes de rochas contendo grafita podem atingir a espessura de 35 mm ou mais. Em termos de diâmetro dos flocos de grafita, pode variar desde 1 mm a mais de 2,5 cm, com média de 0,25 cm. Os

flocos de grafita diferem em dureza e densidade, entre os depósitos mineralizados, e, até mesmo, dentro do próprio depósito (Lobato, 2009).

A grafita em veio cristalino, também chamada de *lump* ou grafita altamente cristalina, é encontrada em veios cristalinos bem definidos ou acumulada em pacotes ao longo dos contatos intrusivos entre pegmatitos e calcário. Esta forma de grafita exibe uma morfologia acicular com cristais orientados perpendicularmente à rocha encaixante. As impurezas incluem: quartzo, feldspato, pirita, piroxênio, apatita e calcita. Esses depósitos, relativamente raros, fornecem grafita maciça, cujos grãos podem ocorrer em vários tamanhos, desde aquele do minério *lump*, até os microcristais (Lobato, 2009).

A grafita amorfa ou microcristalina possui, caracteristicamente, uma aparência preta terrosa e macia ao tato. Alguns depósitos deste tipo foram formados por metamorfismo de contato, enquanto outros são provavelmente resultados da dinâmica (regional) do metamorfismo. A grafita amorfa pode ser encontrada com teor de carbono que varia entre 75 e 90%, e seu tamanho pode variar desde 5 µm até 75 mm. Alguns autores sugerem que os depósitos viáveis economicamente exigem um teor mínimo de carbono da ordem de 8% (Lobato, 2009). A natureza e a quantidade das impurezas dependem da rocha que deu origem ao depósito. O teor de carbono, contido em tais depósitos amorfos, tem relação com a quantidade de sedimentos destes depósitos.

A grafita natural é largamente distribuída na natureza em rochas ígneas, sedimentares, metamórficas e em meteoritos de ferro-níquel na forma de nódulos carbonosos. A qualidade de um depósito de grafita depende das características físicas dos cristais. As concentrações de origem metamórficas são as que apresentam melhores condições de aproveitamento econômico (Duarte, 2008).

Os principais países produtores de grafita natural são China, Rússia, Madagascar, Coreia, Índia, México e Brasil, onde apenas os estados de Minas Gerais e Bahia possuem reservas significativas, representando 99% das reservas nacionais (Figueiredo, 2006).

3.3 TIPOS DE DEPÓSITOS DE GRAFITA

Harben & Bates (1990) inferem que a matéria orgânica existente nos sedimentos é transformada em grafita devido ao metamorfismo, seja ele regional ou de contato. Isto é, o material carbonoso da rocha se cristaliza como grafita à medida que o grau metamórfico evolui progressivamente (temperatura aumenta) e atinge o tamanho de grafita *flake* em fácies anfíbolito alto a granulito.

Quatro tipos genéticos de depósitos de grafita são descritos por Kuzvart (1984) com algumas modificações feitas ao longo dos anos, a saber:

- **Depósitos Magmáticos Primários** – são depósitos extremamente raros, que apresentam material de alta qualidade, em que a grafita maciça predomina. Existem porções internas com ocorrência de grafita *flake*. O principal depósito é o de Botogol, na Rússia.
- **Depósitos do Tipo Contato-Metassomáticos (Skarnitos)** – são depósitos que se desenvolvem no contato entre rochas carbonáticas e intrusões ígneas, seja devido à cristalização do carbono ou pela redução do CO₂. Normalmente, a grafita ocorre na forma de *stocks* ou disseminada em veios do *skarnito*. O principal exemplo é o depósito de Black Donald, no Canadá.
- **Depósitos de Grafita em Veio** – são concentrações de grafita geradas por soluções pós-magmáticas ricas em elementos voláteis, principalmente CO₂. Os depósitos ocorrem em forma de veios e lentes, e são confinados à zona de contato com a rocha encaixante. Depósitos descritos no Sri Lanka podem ser citados como os principais exemplos deste tipo, onde a grafita ocorre no contato de corpos ígneos com gnaisses, quartzitos e piroxenitos.
- **Depósitos Metamórficos** – são gerados por concentração e cristalização do carbonato durante processos metamórficos regionais. São formados em rochas sedimentares que contêm concentração anômala de carbono, resultando em camadas ou lentes ricas em cristais de grafita disseminada em filito, xisto, quartzito, mármore, gnaisse e granulito. Originam-se durante o metamorfismo regional, desde a transição de fácies xisto verde-anfíbolito (~ 480 °C) até a fácies granulito (> 800 °C). A grafita é fina e

microcristalina nas rochas de baixo grau metamórfico (e.g., filito). A formação de grafita lamelar (*flake*) ocorreria a partir da fácies anfibolito intermediária (650°C). Os principais depósitos conhecidos de grafita *flake* são os de Sonora no México e os da Província Grafítica Bahia-Minas.

3.4 GRAFITA NA PROVÍNCIA GRAFÍTICA BAHIA-MINAS

A Província Grafítica Bahia-Minas engloba os depósitos de grafita situados nos municípios de Almenara, Bandeira, Guaratinga, Itamaraju, Jacinto, Jordânia, Maiquinique, Mata Verde, Pedra Azul, Salto da Divisa e Santa Maria do Salto, dentre outros que se localizam no nordeste de Minas Gerais e sul da Bahia (fig. 2.1). A região do presente estudo é um potencial depósito.

Faria (1997) discriminou os tipos de mineralizações de grafita que denominou Tipo Pedra Azul (PAZ) e Tipo Salto da Divisa-Itamaraju (SAI). As mineralizações de grafita do tipo PAZ têm granulação relativamente fina (*flake* fino a microcristalina). Estes depósitos encontram-se em pacotes de xisto pelítico com intercalações de quartzito, correlacionáveis ao Grupo Macaúbas, ou com posição estratigráfica indeterminada, a exemplo das jazidas das localidades de Grafite e Chapada do Barbado (Pedra Azul), Pedro Perdido (Jordânia) e Pousou Alegre (Maiquinique). Nas mineralizações do tipo PAZ considera-se que o metamorfismo atingiu temperaturas entre 600°C e 700°C. A grafita tem granulação geralmente menor que 1 mm e as maiores concentrações ocorrem em fibrolita-grafita xisto e grafita-quartzito xisto, associados com grande quantidade de veios e bolsões (mobilizados) graníticos. As mineralizações do tipo SAI estão associadas à suíte kinzigítica do Complexo Jequitinhonha e, portanto, não tem interesse para este trabalho.

Pedrosa-Soares *et al.*, (1999) e Reis (1999) englobam os tipos de minério de grafita em tipo Gnaisse e tipo Xisto. O primeiro tipo, Grafita Gnaisse, associa-se ao Complexo Jequitinhonha e tem como maior exemplo as faixas grafitosas descritas como Tipo SAI por Faria (1997). O tipo Grafita Xisto associa-se ao Grupo Macaúbas e se caracteriza pelo pequeno tamanho relativo dos cristais de grafita, que ocorrem na forma de palhetas tabulares ou palhetas tabulares esfarrapadas, marcando a xistosidade da rocha.

Daconti (2004) utilizou critérios geológicos, estruturais e, principalmente,

o tipo de rocha hospedeira da mineralização de grafita para distinguir o Distrito Grafítico Almenara-Salto da Divisa (com minério do tipo grafita gnaisse) do Distrito Grafítico Pedra Azul-Bandeira (com minério do tipo grafita xisto).

O Distrito Grafítico Pedra Azul-Bandeira ocupa uma área de aproximadamente 2.500 km² (Daconti, 2004). Os depósitos de grafita estão em rochas do Grupo Macaúbas e do Complexo Jequitinhonha, às vezes na região de contato entre essas unidades. De leste para oeste destacam-se cinco principais zonas mineralizadas de grafita, sendo o litotipo grafita xisto a rocha hospedeira, apresentando cristais de grafita, principalmente sob a forma de farrapos (morfologia microscópica) e palhetas menores que 1 mm.

No seu conjunto, os depósitos de grafita relativamente mais fina situam-se na parte norte da província, onde ocorrem, com mais frequência, os pacotes de sillimanita-biotita xisto do Grupo Macaúbas. Por outro lado, os depósitos de grafita gnaisse com granulação mais grossa estão intercalados na suíte kinzigítica do Complexo Jequitinhonha, cujas temperaturas metamórficas situam-se na transição de fácies anfíbolito-granulito.

IV. MATERIAIS

4.1 APRESENTAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os dados cedidos pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) para o presente estudo. Para cobrir as áreas de interesse foi abordado o projeto aerogeofísico Cândido Sales-Mascote (2009), do qual dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria, no formato GDB, e com todas as etapas de pré-processamento já executadas, foram recortados em folhas de escala 1:100.000. Também foi fornecido o mapa geológico (anexo) na escala 1:250.000, este último disponibilizado publicamente pela CBPM. À frente será descrito o panorama geral desse levantamento.

4.2 PROJETO AEROGEOFÍSICO CÂNDIDO SALES-MASCOTE

A área está localizada na porção sul do estado da Bahia e abrange, parcial ou totalmente, 28 municípios inseridos nas regiões econômicas Sudoeste e Litoral Sul.

O levantamento utilizou como plataforma aerogeofísica uma aeronave de asa fixa contendo um sistema de aquisição de dados composto de um sistema aeromagnético, constituído por sensor de vapor de césio SCINTREX, com resolução de 0,001 nT, nível de ruído de 0,1 nT, com medidas com taxa de amostragem de 10 Hz (10 amostras por segundo) e com leituras dos valores do campo magnético bruto e compensado; e um sistema gamaespectrométrico Picodas, modelo EXPLORANIUM GR-820, de 256 canais espectrais, onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para a determinação precisa dos fotopicos de potássio, urânio e tório, com amostragem a intervalos de um segundo. O sistema detector é constituído por dois conjuntos de cristais (NaI) de 1024 polegadas cúbicas, totalizando 2048 polegadas cúbicas de detectores voltados para baixo (*downward looking*) e dois cristais de 256 polegadas cúbicas cada, voltados para cima (*upward looking*), totalizando 512 polegadas cúbicas.

A área do projeto abrange um bloco com 24.430 km², com 53.831 km de perfis (linhas de voo) aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de alta resolução, com linhas de produção e controle espaçadas de 500 metros e 5.000 metros e orientadas nas direções N-S/E-W (Bloco Cândido Sales) e E-W/N-S (Bloco Mascote), respectivamente. A altura de voo foi fixada em 100 metros sobre o terreno. As operações de campo utilizaram como base de operações as cidades de Vitória da Conquista e Ilhéus. Duas aeronaves foram utilizadas no levantamento fazendo, ao longo dos perfis, aquisições de leituras do magnetômetro e do gamaespectrômetro, e registrando suas posições através de sistema de observação de satélite GPS, com precisão de 1 metro. No processamento dos dados foi empregado o software Oasis montaj, versão 6.4, da Geosoft.

4.3 SOFTWARE

O software Oasis Montaj da GEOSOFT na versão 9.6 foi utilizado ao longo deste estudo. Esta ferramenta possibilitou trabalhar diretamente com os bancos de dados do projeto aerogeofísico apresentado e, desta forma, foi possível efetuar o processamento dos dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria.

Além disso, através do Oasis montaj foi possível integrar os produtos geofísicos provenientes do processamento dos dados com os demais materiais abordados neste trabalho como, por exemplo, o mapa geológico da área de interesse. O Oasis montaj também foi utilizado para gerar os mapas finais dos produtos do processamento de dados dos métodos em questão e, juntamente com um script na linguagem Python, foi aplicada a técnica SOM, melhor explicada a frente, para classificação automática de feições na área de pesquisa.

V. MÉTODOS

5.1 APRESENTAÇÃO

Dentre os métodos geofísicos mais indicados para a prospecção da grafita encontram-se os métodos potenciais, elétricos, eletromagnéticos e gamaespectrométricos. Tais métodos têm respostas excelentes e podem apresentar, a depender das rochas encaixantes, contrastes muito determinantes em suas respectivas propriedades físicas. Tais dados possibilitam uma melhor identificação do alvo de pesquisa.

É esperado que a grafita, com melhor qualidade para aproveitamento econômico, seja encontrada em áreas de metamorfismo regional, possibilitando o uso de dados obtidos por métodos aerotransportados ou terrestres, o que facilita a utilização da geofísica como ferramenta base para a prospecção da grafita. Além disto, sabe-se que as diversas propriedades físicas da grafita permitem que a mesma seja estudada através das respostas de múltiplos métodos geofísicos.

GRAFITA	
Propriedades Físicas	Valores
Densidade	2,09 a 2,25 g/cm ³
Condutividade	0,07 S.m/mm ²
Resistividade	3,5 x 10 ⁻⁵ Ωm
Susceptibilidade Magnética	-200 x 10 ⁶ a -80 x 10 ⁶ SI
Dureza	1 a 2
Clivagem	Basal Perfeita

Tabela 1: Propriedades Físicas da Grafita. Fonte: Autora.

Neste trabalho serão utilizados dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria existentes sobre as ocorrências de Macarani, disponibilizados para a pesquisa. A seguir serão descritos brevemente cada um dos métodos citados acima.

5.2 MÉTODO AEROMAGNETOMÉTRICO

A maior parte do campo magnético terrestre não se origina na crosta, mas são as menores variações do campo, devido aos materiais magnéticos da mesma, que são o interesse da exploração mineral. Para este estudo, será mostrado a frente no trabalho como o método contribui na exploração de grafita, um mineral sem propriedades magnéticas. O tópico a seguir descreverá brevemente o funcionamento do método e como acontece seu aerolevanteamento.

Levantamentos aeromagnéticos medem a intensidade total do campo magnético da Terra. Como descrito em Reeves (2005), essa medição é uma combinação do campo nuclear terrestre (documentado no mundo todo como o IGRF, *International Geomagnetic Reference Field*) e o campo produzido pelas rochas da crosta, cujas propriedades magnéticas são significativas. Essa medição é chamada de Intensidade Magnética Total (TMI), mas deve-se atentar para o fato de que imagens de TMI, que são o produto básico de um levantamento aeromagnético, são normalmente a diferença entre o campo medido e o IGRF. Esse campo residual é comumente chamado de campo magnético anômalo e, em alguns casos (particularmente em imagens de escala crustal), de *anomalia magnética* (Isles & Rankin, 2013).

As componentes vetoriais do campo são frequentemente medidas a bordo da aeronave, mas raramente são usadas como produtos do levantamento. O nano Tesla (nT) é a unidade de medida do campo, e esta varia de 70.000 nT, próximo aos polos, a 25.000 nT, em regiões equatoriais. Levantamentos modernos detectam e definem prontamente sinais geológicos de menos de 0,25 nT e, onde é dada atenção especial à aquisição com pouco ruído, níveis mínimos de sinal de 0,05 nT são alcançáveis. Variações no campo devido às rochas magnéticas estão comumente na ordem de milhares de nT e, ocasionalmente (acima de grandes corpos com magnetita), podem ser tão grandes quanto 50.000 nT (Isles & Rankin, 2013).

A definição do campo geomagnético principal como uma grandeza vetorial, em qualquer ponto da superfície terrestre, requer três valores escalares, normalmente expressos como três componentes ortogonais (componentes vertical, horizontal-norte e horizontal-leste) ou a magnitude escalar do vetor de

campo total e sua orientação em mergulho e azimute. Com exceção de alguns levantamentos especializados, os levantamentos aeromagnéticos sempre mediram apenas a magnitude escalar denominada, F , tornando o último sistema mais conveniente. O ângulo que o vetor de campo total faz acima ou abaixo do plano horizontal é conhecido como a inclinação magnética, I , que é convencionalmente positiva ao norte do equador magnético e negativa ao sul dele ($-90^{\circ} \leq I \leq +90^{\circ}$). O ângulo entre o plano vertical que contém F e o norte verdadeiro (geográfico) é conhecido como a declinação magnética, D , que é considerada positiva para o leste e negativa para o oeste (Reeves, 2005).

As variações em F ao longo do tempo, variando de segundos a milhões de anos, têm efeito sobre a realização de levantamentos magnéticos, subtração do campo principal do campo medido para resultar na anomalia, inversão dos dados e, sobre a interpretação das anomalias resultantes (Reeves, 2005).

Estratégias para a condução de levantamentos magnéticos podem ser determinadas pela necessidade de registrar mudanças temporais no campo geomagnético que ocorrem durante o levantamento, para que possam ser removidas durante a redução dos dados. O problema é resolvido pela combinação de leituras repetidas e monitoramento contínuo do campo. Este último é feito através do estabelecimento de um segundo magnetômetro, a estação base, num local fixo próximo ou central à área de levantamento para registrar as mudanças no campo geomagnético (Dentith & Mudge, 2014).

Levantamentos aeromagnéticos normalmente compreendem uma série de linhas paralelas e linhas de controle como apropriado. O espaçamento das linhas, suas direções e a altura de levantamento são os parâmetros principais a serem considerados no planejamento do aerolevanteamento. Quando o levantamento é conduzido por um veículo em movimento, a aeronave, o intervalo de dados ao longo da linha é determinado pela velocidade de voo e pela taxa de amostragem do magnetômetro. Além da medição do TMI, a localização das estações, obtida através do GPS, e a altura de voo, obtida de um altímetro, são medidas e registradas, normalmente, a cada 0,1 segundos (amostragem de 10 Hz) (Dentith & Mudge, 2014).

A altura do sensor é uma variável chave no planejamento do levantamento, afetando tanto a amplitude quanto o comprimento de onda das anomalias detectadas (Dentith & Mudge, 2014). Isto significa que, se a altura do

sensor for reduzida, aproximando este das fontes magnéticas, serão detectadas maiores amplitudes, menores comprimentos de onda e maiores frequências. Isto pode ser um problema a depender do objetivo do estudo. Se o alvo for estruturas mais profundas, o material magnético próximo à superfície pode agir como fonte de interferência, onde, neste caso, medir menores amplitudes, maiores comprimentos de onda e menores frequências é o principal interesse. A amplitude e o comprimento de onda da resposta magnética também são sensíveis à separação fonte-sensor.

A direção das linhas do levantamento requer atenção particular ao longo do planejamento do levantamento aeromagnético, já que é dependente da latitude magnética da área estudada. Em latitudes médias a altas, ou seja, em direção aos polos, as linhas do levantamento devem ser orientadas perpendicularmente ao *strike* regional das fontes magnéticas. Em contraste, em baixas latitudes (menos de 30°), o baixo e o alto da anomalia são deslocados na direção do meridiano magnético para os limites norte e sul da fonte, respectivamente, independentemente da forma e *strike* do corpo magnético (Dentith & Mudge, 2014).

O espaçamento das linhas é fundamental para determinar a resolução lateral do levantamento. As linhas do levantamento podem ser amplamente espaçadas quando são medidas respostas com longos comprimentos de onda, e mais curtas quando o contrário, mas, em todos os casos, devem ser suficientemente próximas para resolver adequadamente as características de interesse. Levantamentos com menores alturas de voo enfatizam respostas com menores comprimentos de onda, que requerem um espaçamento menor entre as linhas para reduzir falseamento e permitir que os dados sejam apropriadamente 'gridados' (Dentith & Mudge, 2014).

5.3 PROCESSAMENTO DE DADOS DE AEROMAGNETOMETRIA

O processamento dos dados aeromagnéticos (fig. 5.1) se deu através da manipulação do banco de dados fornecido, no que consta da mudança de sistema de referência (datum), da escolha do melhor método de interpolação e elaboração de *grids*. Como o pré-processamento já havia sido feito pela CBPM, foi apenas necessário um controle de qualidade dos dados e verificação do

nivelamento.

A partir daí foi usado o Campo Magnético Anômalo (CMA), que resulta da subtração do campo magnético total do *IGRF*, como referência para gerar os demais produtos provenientes da magnetometria. Assim, foram obtidos, a **amplitude do sinal analítico (ASA)**, a **primeira derivada vertical (Dz)**, a **inclinação do sinal analítico (ISA)** ou *tilt derivative* e a **diferença da continuação ascendente**, que serão descritos a seguir.

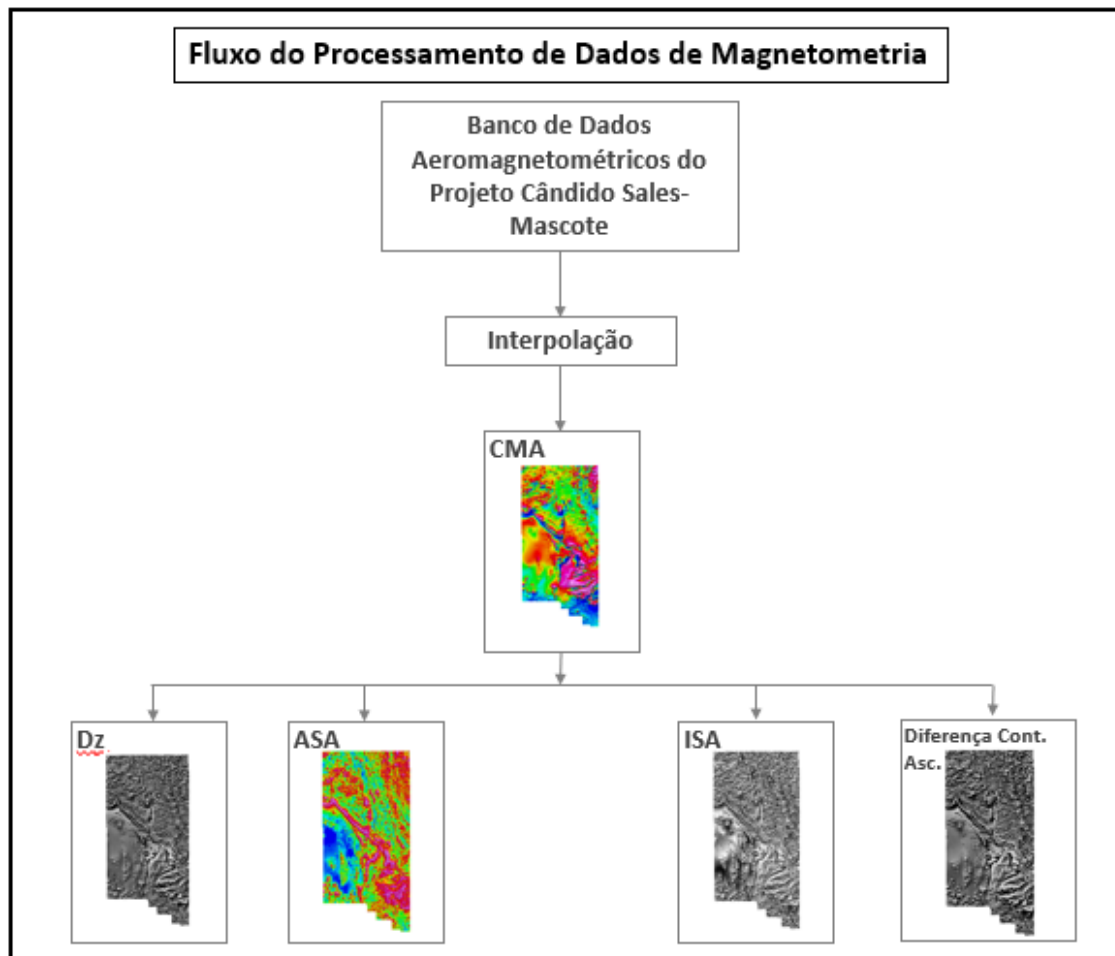


Figura 5.1: Fluxo de processamento simplificado aplicado aos dados de magnetometria.

5.3.1 Interpolação dos Dados Magnéticos

A interpolação é o processo matemático de encontrar valores intermediários entre os valores discretos de uma função (Stark, 1979). O raciocínio base da interpolação é que, em média, os valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados.

Um fator preponderante no resultado da interpolação é o algoritmo usado na seleção dos dados em volta do ponto que está sendo estimado. Um algoritmo adequado deve honrar os valores de pontos originais ao mesmo tempo em que produz uma superfície contínua e suave (Carvalho, 2006).

Para definir a célula de interpolação em dados de aerolevantamentos é necessário escolher valores que estejam entre $1/4$ e $1/8$ do espaçamento médio entre as linhas de voo, isso objetiva evitar perdas de informação e recuperar as frequências.

No entanto, segundo Gunn, (1998), a resolução espacial não deve ser menor que $1/5$ do espaçamento entre as linhas de voo, pois pode causar diversos problemas, como o surgimento do fenômeno conhecido como falseamento (*aliasing*), em que as anomalias com comprimentos de onda menores do que as resoluções espaciais aparecem superpostas aos sinais medidos.

Alguns métodos de interpolação foram testados, e o que obteve melhor resultado baseado na disposição dos pontos de amostragem, norte-sul, foi o bidirecional.

O método bidirecional explora a correlação linha a linha dos dados, aplicando a interpolação através de *splines* cúbicos, tanto ao longo, como perpendicularmente à direção das linhas de voo. Inicialmente, os dados foram interpolados ao longo das linhas de voo, em um intervalo igual ao espaçamento da célula, definido como $1/4$ do espaçamento das linhas, neste caso de 125 m. Logo depois, esses valores foram interpolados perpendicularmente à direção de voo com espaçamento igual ao tamanho da célula.

O método acima foi comparado com o método de mínima curvatura, que usa *splines* bidimensionais para ajustar os dados, e foi notada uma melhora em relação à qualidade da interpolação, tendo sido dada a preferência ao bidirecional.

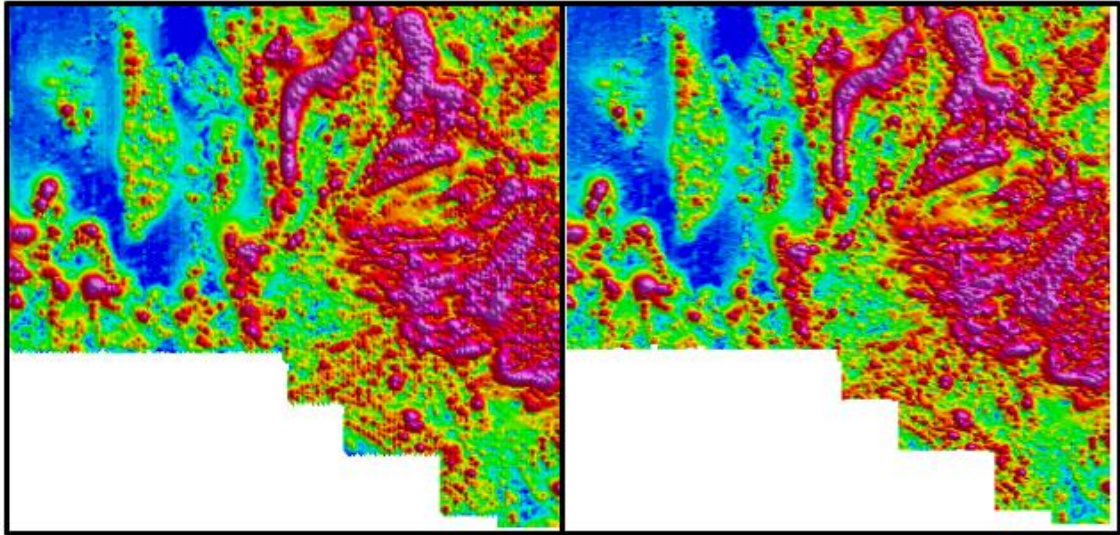


Figura 5.2: Comparação entre os métodos de interpolação de Mínima Curvatura (à esquerda) e Bidirecional (à direita).

5.3.2 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O conceito de sinal analítico foi desenvolvido por Nabighian (1972,1984) e uma importante característica desenvolvida nesta técnica é a independência em relação à direção do vetor de magnetização da fonte. A amplitude do sinal analítico é simplesmente relacionada à intensidade de magnetização. Isto é particularmente útil na análise de dados de regiões de baixas latitudes, onde o TMI (*Total Magnetic Intensity*) fornece resolução espacial limitada e quando a fonte tem uma forte magnetização remanente (MacLeod *et al.*, 1993).

Uma grande vantagem que o mapa de sinal analítico oferece é a opção de selecionar anomalias de interesse geológico, já que seu algoritmo permite transformar as variações de diferentes direções em variações somente positivas, que exibem um resultado que se corresponde diretamente com o grau de magnetização que apresentam as rochas, isto ajuda também na melhor definição das bordas das fontes magnéticas, simplificação de suas geometrias e centralização das anomalias, colaborando na identificação de estruturas.

A combinação dos três gradientes direcionais do campo magnético para obter o gradiente total remove as complexidades das respostas às derivadas (Dentith & Mudge, 2014). Quando aplicado ao dado, o gradiente total em um ponto (x, y) é conhecido como a amplitude do sinal analítico, dado por:

$$|SA(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}$$

Equação 1: Cálculo da amplitude do sinal analítico em nT/m.

Onde A é a amplitude da anomalia magnética. Onde o espaçamento das linhas de voo é significativamente mais largo, a derivada-Y não é bem definida, e assim sendo, é preferível assumir que a geologia é bidimensional e considerar a derivada na direção Y como zero.

5.3.3 Primeira Derivada Vertical

A primeira derivada vertical é a taxa de mudança da intensidade do campo na direção vertical. Este filtro é aplicado no domínio da frequência, no qual as derivadas das anomalias são calculadas em relação à Z. Através desse filtro é possível definir os limites das anomalias magnéticas e destacar as altas frequências com pequeno comprimento de onda, evidenciando fontes mais rasas em detrimento das fontes mais profundas, logo, é um filtro passa-alta. Geralmente, a primeira ou a segunda derivada vertical acentua os gradientes nas bordas de corpos magnéticos rasos. O filtro permite que as respostas de pequenas e grandes amplitudes sejam representadas de forma equivalente.

A primeira derivada vertical é normalmente combinada com outros produtos de características superficiais, como por exemplo o mapa ternário de Tório, Urânio e Potássio, gerando o mapa litoestrutural geofísico, utilizado no presente trabalho. O filtro é representado por:

$$Dz = \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)$$

Equação 2: Cálculo da primeira derivada vertical em nT/m.

5.3.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou *Tilt Derivative* (TDR)

A inclinação do sinal analítico (ISA), ou também chamada *tilt derivative*, é uma transformação de fase que pode ser utilizada para detectar fontes magnéticas e fornecer informações sobre suas extensões horizontais, sendo útil

no mapeamento de estruturas rasas. Ela é dada pela razão entre a primeira derivada vertical e o gradiente horizontal total da intensidade do campo magnético total:

$$ISA = \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial A}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2}} \right)$$

Equação 3: Cálculo da ISA variando entre $\pm 90^\circ$.

Como a técnica é baseada no ângulo que tangencia às derivadas, o alcance deste varia de $-\pi/2$ a $+\pi/2$. Devido a isso, o *tilt derivative* consegue detectar anomalias de diferentes amplitudes (altas ou baixas), tendo seu pico positivo sobre a fonte, pico zero sobre (ou próximo) as bordas e pico negativo fora da fonte. Assim, essa transformação funciona melhor para detectar a posição das fontes do que das bordas.

Segundo Thurston e Smith (1997), a inclinação do sinal analítico permite estimar o mergulho e o contraste de susceptibilidade magnética das fontes. A diferença entre a ASA e a ISA é que a inclinação analisa a fase do sinal, que tende a aparecer constante em uma mesma estrutura, enquanto que a amplitude pode apresentar variações, dificultando a interpretação.

5.3.5 Diferença da Continuação Ascendente

O campo magnético medido em um plano de observação a uma altura constante pode ser recalculado para outro plano mais acima (Reeves, 2005). Este é o conceito da continuação ascendente (*upward continuation*), que pode ser representada no domínio da frequência como:

$$F(\omega) = e^{-h\omega}$$

Equação 4: Equação da continuação ascendente, onde h equivale à altura continuada e ω ao número de onda.

Esta função decai constantemente com o aumento do número de onda, atenuando mais severamente os maiores números de onda. Portanto, gera um mapa com conteúdo de baixa frequência onde as feições mais regionais predominam.

A continuação ascendente representa, então, uma simulação de levantamento com altura superior à da atual aquisição. No presente estudo, a simulação foi feita para uma continuação de 50 m e outra de 100 m.

O filtro da diferença da continuação ascendente é alcançado subtraindo dois *grids* de continuação ascendente com alturas distintas. Através desse procedimento, além de destacar as anomalias residuais e suavizar os conteúdos regionais, também é possível minimizar ruídos.

5.4 MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO

O método radiométrico, ou gamaespectrométrico, mede a radioatividade natural em forma de raios gama. Boa parte desta radiação se origina de espécies minerais que contêm isótopos radioativos de Urânio (^{238}U), Tório (^{232}Th) e Potássio (^{40}K). Este último isótopo é bastante comum em rochas ricas em potássio, que podem não estar associadas a concentrações de U e Th, assim, pode obscurecer a presença de depósitos importantes e constitui uma forma de 'ruído' geológico neste método (Kearey, Brooks & Hill, 2009).

O aerolevanteamento de radiometria é bastante comum na exploração mineral, onde os dados radiométricos são adquiridos simultaneamente com os magnéticos (Dentith & Mudge, 2014). Esses são úteis no mapeamento geológico, pois diferentes tipos de rocha podem ser reconhecidos por sua distinta assinatura radioativa (Moxham, 1963; Pires & Harthill, 1989).

A intensidade da radiação medida depende de alguns parâmetros. Isto inclui a intensidade real da radiação emitida pelas fontes radioativas, o tamanho espacial das fontes radioativas com respeito ao intervalo espacial de amostragem, o tipo e natureza do detector, e o tempo disponível para fazer medições individuais. Esses parâmetros também afetam a acurácia da medição (Dentith & Mudge, 2014).

Os resultados apresentados pelo detector são convencionalmente o número de contagem de emissões num período fixo de tempo. O decaimento radioativo é um processo aleatório que segue uma distribuição de Poisson com o tempo, de forma que a contagem adequada dos tempos é importante para que o erro estatístico na contagem dos eventos de decaimento seja mantido num nível aceitável (Kearey, Brooks, & Hill, 2009).

Um importante parâmetro no planejamento do levantamento radiométrico e na interpretação dos dados é o campo de visão do detector. Quanto mais perto o detector estiver da fonte, menor a chance de os raios gama serem atenuados pelo ar. Como consequência, a medição radiométrica é influenciada por fontes radioativas próximas ao detector, então a contribuição máxima vem de imediatamente abaixo dele. Já que a atenuação é menor para raios gama de maior energia, a medição também é mais influenciada por radiação de alta energia (Dentith, & Mudge, 2014).

5.5 PROCESSAMENTO DE DADOS DE AEROGAMAESPECTROMETRIA

O processamento dos dados radiométricos teve parte de seu fluxo similar ao método aeromagnético, no que se refere ao georreferenciamento, aos testes de interpolação e gridagens. O processamento foi feito em um projeto Geosoft à parte do magnético, porém, posteriormente, alguns canais/*grids* da base de dados (*geosoft database*) da radiometria foram incluídos na base de dados de magnetometria para facilitar a integração dos métodos, construção de mapas e também, a utilização da técnica de Self-Organizing Maps.

Os produtos abordados pelo processamento dos dados de aerogamaespectrometria foram mapas temáticos de **Tório, Urânio e Potássio**, composição ternária entre os mapas de Tório, Urânio e Potássio (**mapa ternário**), mapas contendo as razões **Tório/Urânio, Urânio/Potássio e Tório/Potássio** e o **mapa litoestrutural geofísico**, resultado da composição dos mapas ternário e da primeira derivada vertical.

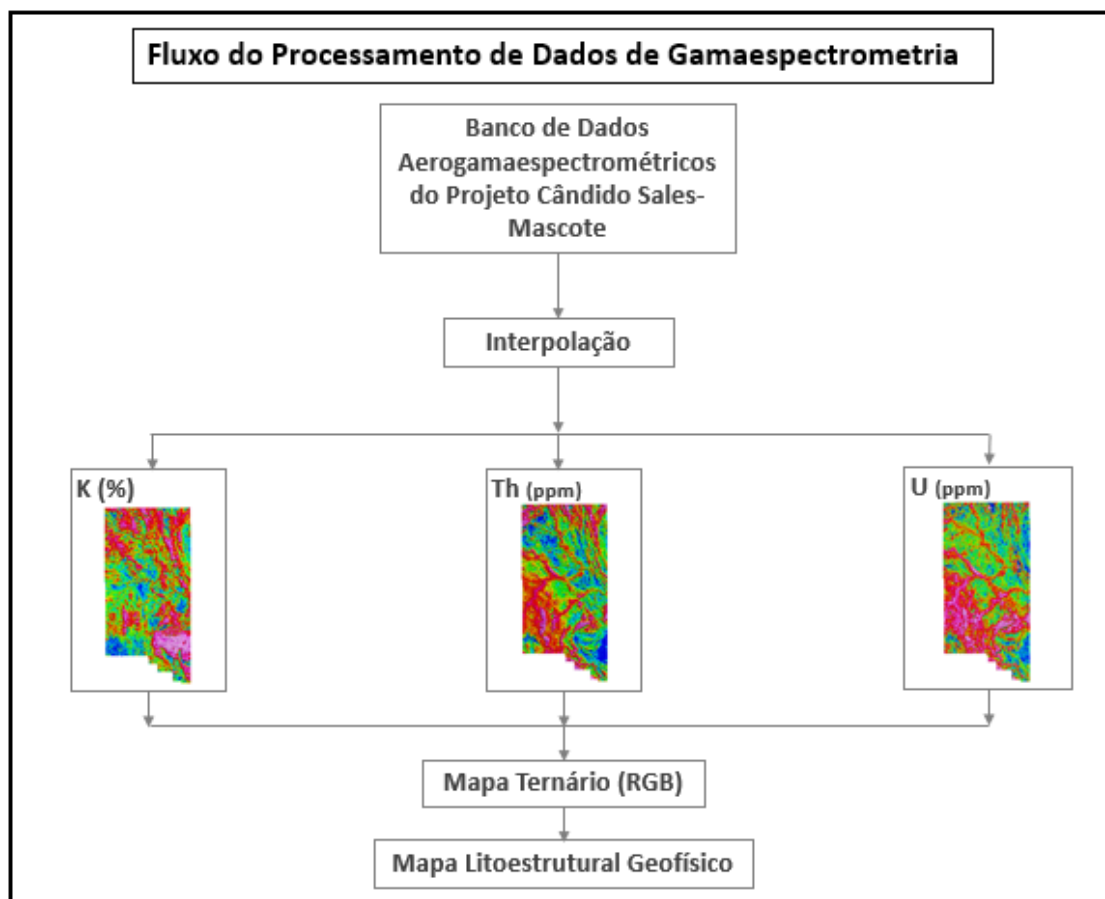


Figura 5.3: Fluxograma do processamento dos dados de gamaespectrometria.

5.5.1 Interpolação dos Dados Gamaespectrométricos

Para gerar os *grids* de cada radioisótopo foram feitas interpolações com os canais de Tório (ppm), Urânio (ppm) e Potássio (%). O mesmo método de interpolação utilizado para interpolar os dados de aeromagnetometria foi aplicado aos dados de aerogamaespectrometria, o método bidirecional. O tamanho da célula também foi determinado como 125 m tendo em vista o espaçamento de 500 m das linhas de voo.

5.5.2 Mapas Ternários

Com os *grids* de Th (ppm), U (ppm) e K (%) foi possível gerar o mapa ternário com a composição RGB (Red-Green-Blue) e assim, efetuar interpretações sobre a configuração geológica superficial da região de Macarani.

Outro produto extraído foi o mapa litoestrutural geofísico, obtido pela

composição ternária RGB dos canais Th (ppm), U (ppm) e K (%) com o *grid* da primeira derivada vertical gerado no processamento dos dados de magnetometria. Esse mapa se destaca por conta do detalhe superficial associado aos dados radiométricos e do detalhamento de anomalias de alta frequência.

5.6 SELF-ORGANIZING MAPS (SOM)

O Self-Organizing Map (SOM) é um algoritmo de aprendizagem não supervisionada introduzido por Kohonen em 1982, que age como uma técnica de classificação usada para analisar e visualizar dados em larga escala.

É baseado no princípio das medidas do vetor de quantização e já se provou uma ferramenta ideal para análise de *data set* com parâmetros geofísicos díspares (Aisengart, *et al.*, 2019).

Esta rede neural possui um conjunto de elementos de entrada e um conjunto de elementos de saída que correspondem aos *clusters*. O SOM consiste de um *grid* regular de poucas dimensões, normalmente um mapa 2D, de m nós, também chamados de neurônios. É recomendado organizar os elementos dos *clusters* em forma de uma rede bidimensional porque esta topologia assegura que cada neurônio tenha vários vizinhos (Pastukhov, *et al.*, 2016). Este arranjo determina quais elementos serão ajustados dentro do raio do elemento de *cluster* vencedor. Cada neurônio i tem um vetor peso d -dimensional $w = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{id})$, onde $i = (1, 2, \dots, m)$, que tem a mesma dimensão do espaço de entrada.

O algoritmo de aprendizagem convencional do SOM pode ser explicado usando os seguintes passos (Chaudhary *et al.*, 2014):

- 1) Inicialize os vetores peso w_i dos $m \times n$ neurônios;
- 2) Selecione aleatoriamente um vetor de entrada $x(t)$ e ele será inserido em todos os neurônios ao mesmo tempo em paralelo.
- 3) Encontre o neurônio vencedor c , i. e., a *Best Matching Unit* (BMU) usando a equação:

$$c = \arg (\min_{1 \leq i \leq mn} \{ \|w_i(t) - x(t)\| \})$$

Equação 11: Equação para escolha da BMU.

Onde $\|\cdot\|$ é a distância euclidiana medida e $x(t)$ e $w_i(t)$ são a entrada e o vetor peso do neurônio i na iteração t , respectivamente. O vetor peso do neurônio vencedor está localizado o mais perto do vetor de entrada, então a saída é definida com unidade igual.

4) O vetor peso dos neurônios é atualizado usando a equação:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + h_{c,i}(t)[x(t) - w_i(t)]$$

Equação 12

Onde $h_{c,i}$ é uma função de vizinhança Gaussiana que controla o valor de ajuste do vetor peso a cada iteração e é descrita por:

$$h_{c,i}(t) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-\frac{\|R_c - R_i\|^2}{2\sigma^2(t)}\right)$$

Equação 13

Onde R é a posição da coordenada do neurônio no mapa, $\alpha(t)$ é a taxa de aprendizagem e $\sigma(t)$ é a largura do raio de vizinhança. As posições dos elementos de *clusters* são refinadas no espaço de entrada.

O raio R é iniciado em um valor suficientemente alto, e decresce a cada iteração até um único elemento vencedor. A lei da mudança de raio é ajustada experimentalmente. No caso mais simples, o raio decresce de forma linear a cada passo (Pastukhov, A. A. *et al.*, 2016).

5) Para todo dado de entrada, os passos de b) a d) são repetidos.

O critério que indica a finalização do processo é a quantidade de alterações no vetor peso da iteração consequente: se for menor que o valor pré-determinado, o processo está completo.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresentará os resultados decorrentes do processamento dos dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria através de mapas. Também serão exibidas as interpretações dos produtos extraídos dos métodos, ou seja, identificação de anomalias e estruturas, e consecutiva correlação com os dados geológicos disponíveis.

As interpretações a seguir foram feitas através de uma análise visual, qualitativa, comparando as respostas geofísicas com a geologia regional. As interpretações geofísicas foram geradas através dos produtos obtidos pelo processamento de dados geofísicos sem auxílio dos dados geológicos. Posteriormente, essas informações foram correlacionadas com os dados litológicos e estruturais do mapa geológico da área de estudo para checar sua consistência. Para complementar os resultados da aerogamaespectrometria, que estão associados às feições superficiais, foram usados os resultados de aeromagnetometria, que permitiram uma análise estrutural das anomalias em superfície e subsuperfície.

6.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS

A seguir estão expostos os produtos provenientes dos procedimentos de processamento e filtragem dos dados da aeromagnetometria, que serão seguidos pelas respectivas interpretações e discussões acerca de suas principais características. Diversas técnicas foram aplicadas aos dados aeromagnéticos e tiveram como objetivo realçar estruturas e facilitar a discriminação das assinaturas magnéticas para melhor interpretação das diferentes unidades.

A etapa de interpretação envolveu a análise visual dos dados, que inclui o traçado dos lineamentos, definição dos domínios magnéticos e análise do espectro de potência para definição de possíveis profundidades das fontes magnéticas. Com isso, foram gerados mapas das estruturas e feições

magnéticas, além de mapa do domínio magnético.

6.2.1 Campo Magnético Anômalo

O primeiro mapa a ser analisado foi o do campo magnético anômalo (CMA; fig.6.1). Este teve o objetivo de individualizar unidades com comportamentos distintos e padrões de assinaturas que pudessem traduzir feições importantes (lineamentos e anomalias magnéticas negativas).

O mapa mostra que a área tem um comportamento magnético bem movimentado, com porções de alta intensidade magnética (vermelho a magenta) e áreas de intensidade intermediária (verde a azul claro), com tendências variando de NW-SE a N-S.

Analisando a partir da porção norte do mapa, percebe-se duas regiões de altos magnéticos, uma, bem a leste e, outra, a oeste com presença de fontes magnéticas dipolares (estruturas com alto e baixo juntos, ou seja, magenta e azul), e uma faixa central com valores intermediários, de comportamento majoritariamente NW-SE.

Na porção central do mapa há certo padrão definido por feições de alta frequência, que seguem um lineamento de direção NW-SE e cruzam o mapa de leste a oeste. Nesta área é percebida uma estrutura linear caracterizada como uma camada litológica. Este lineamento é bordado por frequências intermediárias a baixas.

Na parte sul, há predominância de anomalias negativas (azuis) com tendências NW-SE, mas também, em algumas porções, direção quase NE-SW. No canto direito segue a continuação da feição de altos valores magnéticos que emenda na porção central do mapa, mas com lineamentos de direção NE-SW.

Sendo assim, tomando uma visão geral do mapa de CMA, é possível dizer que há uma sucessão de estruturas lineares do centro ao norte na parte oriental do mapa e a presença de uma forte fonte magnética no sudeste da área. Também é possível delinear o contato da grande estrutura linear central do mapa e seus segmentos com uma zona de fonte magnética profunda bordada por valores mais baixos.

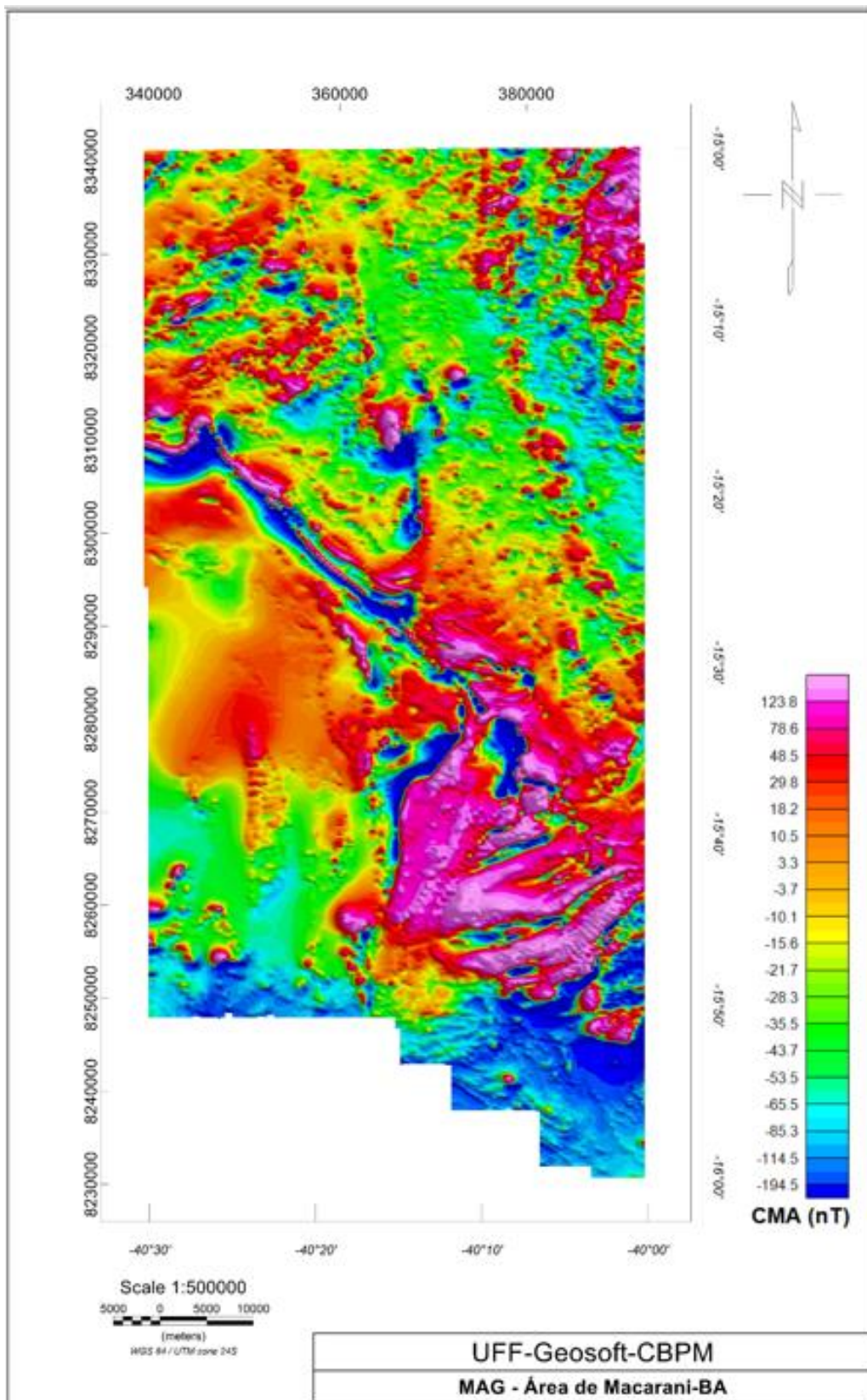


Figura 6.1: Mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) da área de estudo. Fonte: Autora.

Para complementar a interpretação do mapa de CMA, foi usado o mapa da primeira derivada vertical (Dz ; fig. 6.2), que se trata de um filtro passa-alta. Logo, tem a intenção de evidenciar as fontes mais rasas, em detrimento das mais profundas, ajudando a destacar as altas frequências com pequenos comprimentos de onda e a definir os limites das anomalias magnéticas.

Assim como no mapa do CMA (fig. 6.1), é possível notar as feições lineares no canto superior direito da área, e também o grande lineamento na região central do mapa. O mapa de Dz sugere que não foi possível identificar, apenas com o CMA, a presença de densos lineamentos da estrutura a sudeste do mapa com direção NE-SW e também um alto de formato lenticular na região sudoeste com orientação N-S.

Também se observa uma possível descontinuidade do lineamento N-S centralizado no mapa, que poderia ter sido causada pela estrutura linear de direção NW-SE, gerando então a hipótese de esta ter uma falha em sua composição estrutural.

Outro aspecto do mapa da primeira derivada vertical é a evidente separação em quatro áreas em relação à rugosidade apresentada. Na parte superior do mapa é notável a diferenciação em duas regiões: uma que começa mais à esquerda, e se estende até o lado direito do mapa, e a outra que corta a primeira em sua região central mostrando-se menos rugosa. As duas áreas restantes podem ser caracterizadas pela região do mapa dentro da estrutura côncava, e a zona de lineamentos NE-SW com altos magnéticos à sudeste.

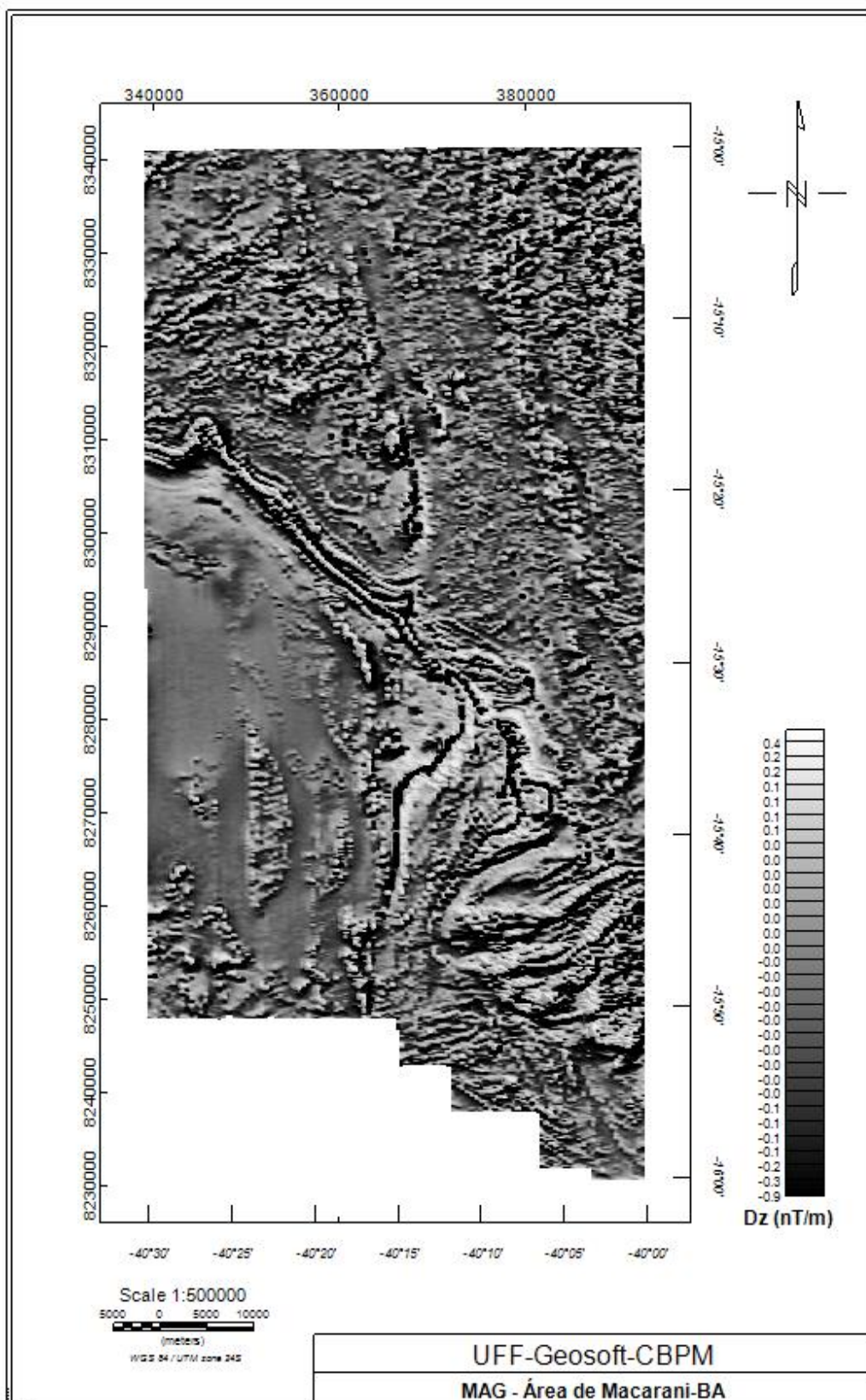


Figura 6.2: Mapa da Primeira Derivada Vertical (Dz). Fonte: Autora.

6.2.2 Interpretação das Estruturas Magnéticas

Apesar da grande densidade de informação, com o mapa da inclinação do sinal analítico (ISA; fig. 6.3) foi possível avaliar questões estruturais. Sendo assim, através deste mapa é possível notar zonas de lineamentos de direção NE-SW cortados por lineamentos secundários, de maior intensidade, de direção NW-SE na parte norte da área. Seguindo esta ordem, a feição descrita até o momento como um lineamento litológico ou uma falha, de direção NW-SE, parece deslocar o lineamento central ao mapa e dividi-lo em dois segmentos, um ao sul e outro ao norte como visto anteriormente com o mapa de Dz (fig. 6.2). E observando a parte sul do mapa, é possível destacar alinhamentos de direção N-S mais concentrados na região sudoeste.

Dois estruturas se destacam em relação à intensidade do sinal: uma é a zona mais clara à esquerda do mapa com formas arredondadas e a outra é do lado oposto, um pouco mais ao sul, definida como a estrutura de lineamentos NE-SW do sudeste do mapa.

A interpretação dos lineamentos magnéticos se deu a partir da análise de todos os temas magnetométricos. No entanto, a imagem da inclinação do sinal analítico, combinada com a da amplitude do sinal analítico (ASA + ISA; fig. 6.4), serviu para melhor observar as estruturas lineares, enquanto que as outras imagens serviram para as demais feições estruturais.

A interpretação dos lineamentos magnéticos (fig. 6.5) permitiu observar a distinção de vários eventos estruturais magnéticos e foram demarcados aqueles que puderam ser traduzidos em assinaturas devido às deformações que afetaram a região.

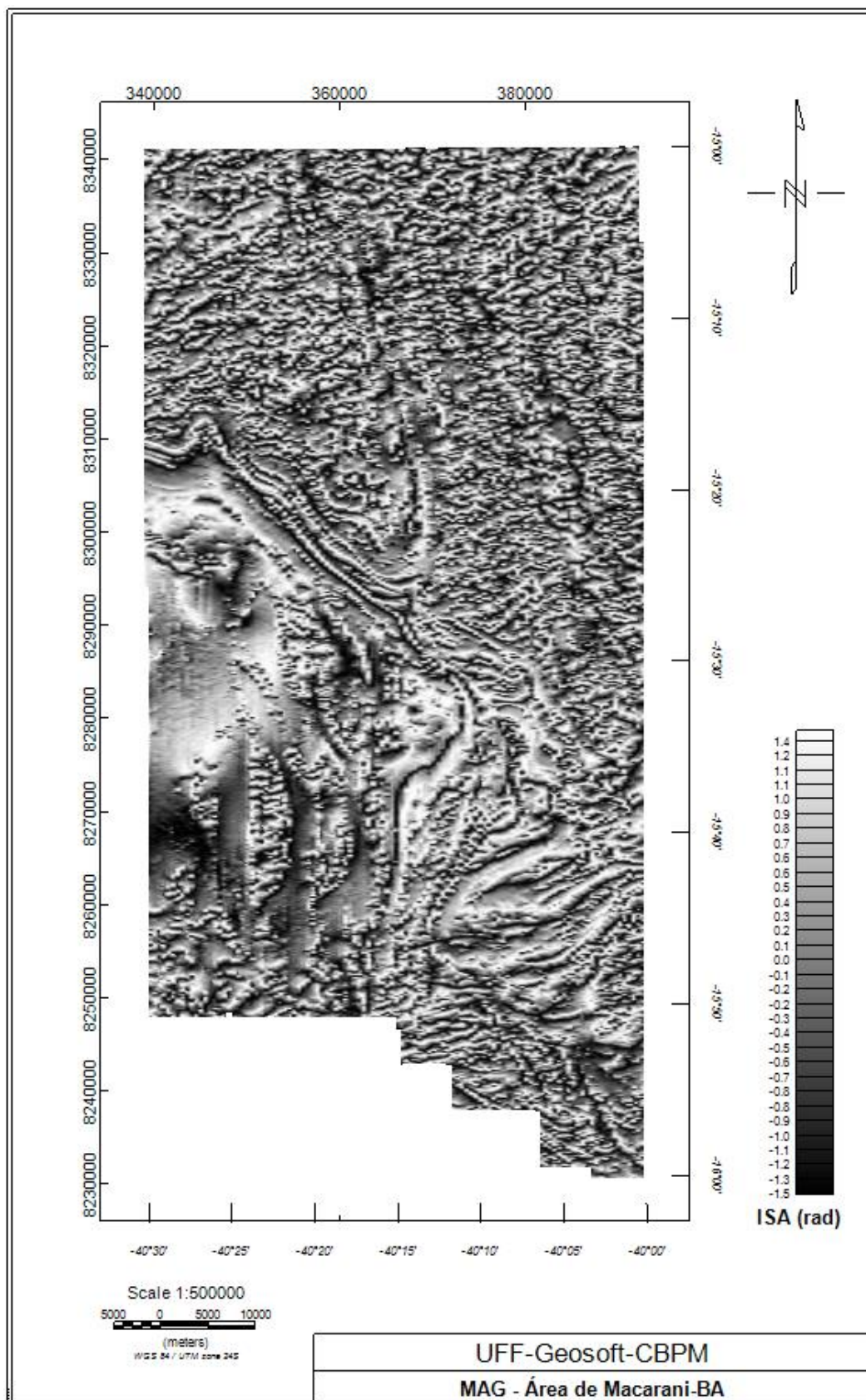


Figura 6.3: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ISA). Fonte: Autora.

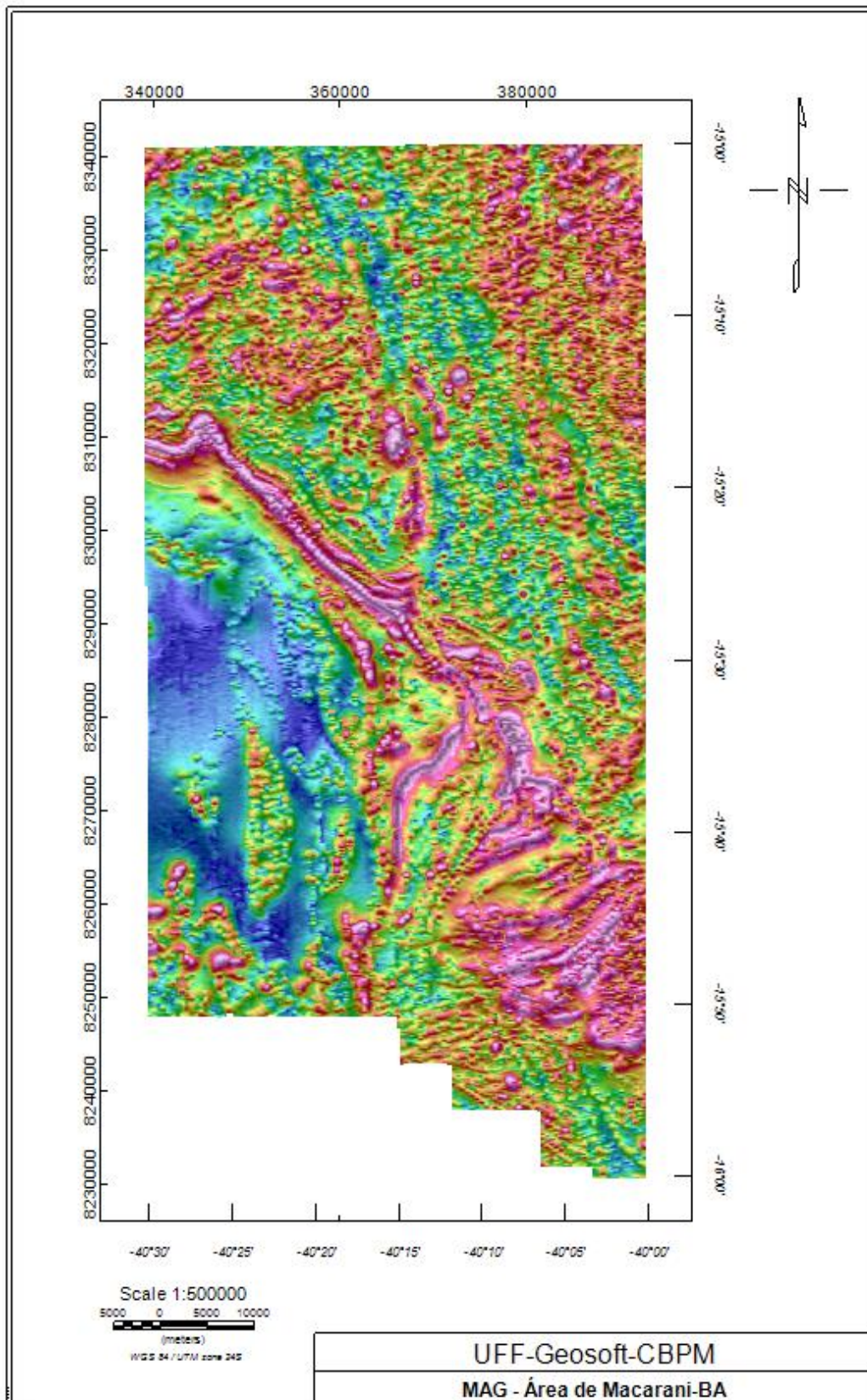


Figura 6.4: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico somado ao mapa da Inclinação do Sinal Analítico (ASA + ISA). Fonte: Autora.

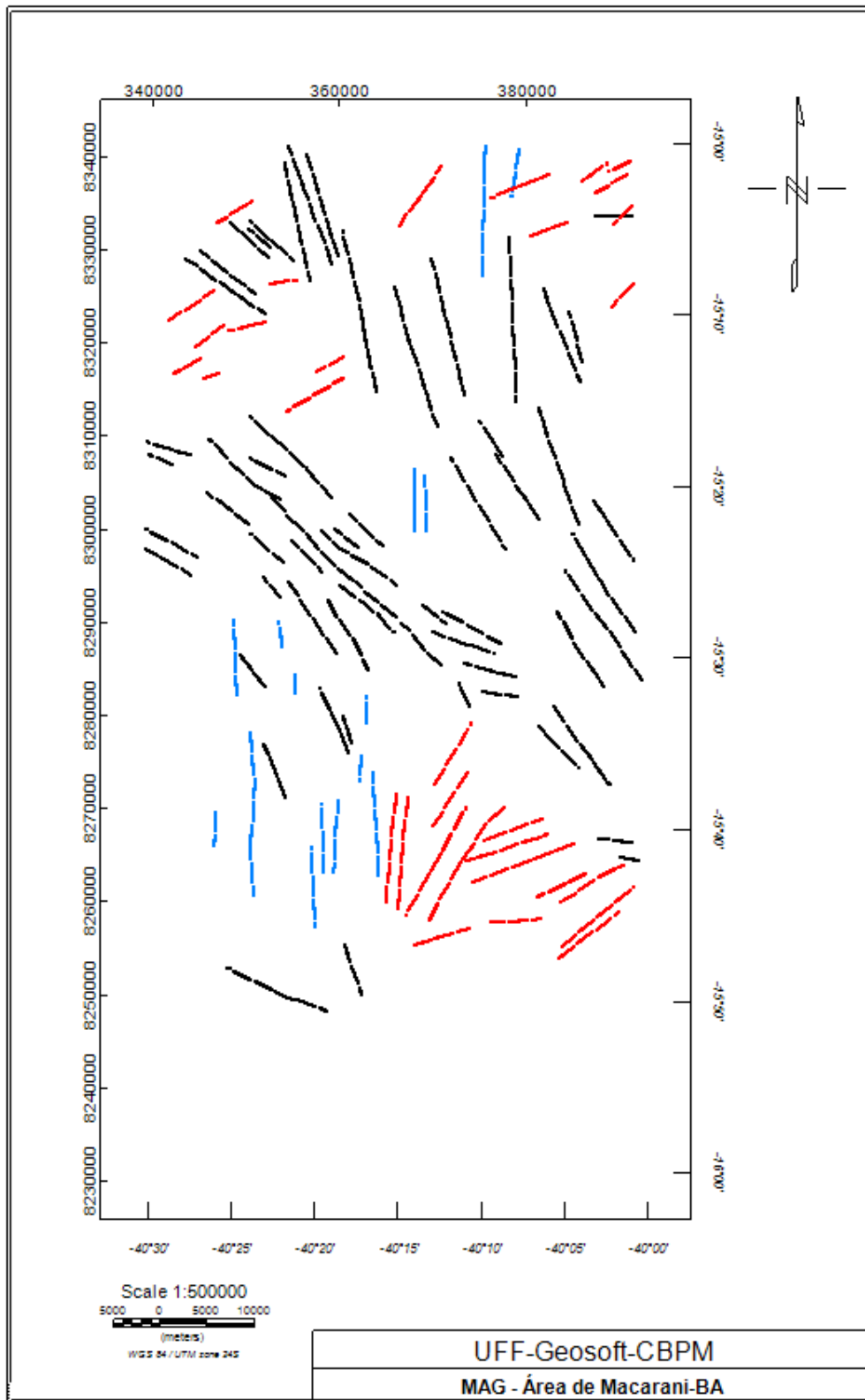


Figura 6.5: Mapa de estruturas magnéticas lineares interpretadas a partir das imagens magnéticas. Fonte: Autora.

O melhor produto para interpretação e visualização complementar do dado magnético foi a combinação dos mapas de amplitude do sinal analítico e inclinação do sinal analítico (fig. 6.4). Analisando este mapa foi possível uma melhor identificação e compreensão das feições previamente descritas, o que colaborou com a interpretação da estrutura linear NW-SE.

Foram feitas duas suposições acerca desta estrutura: uma das hipóteses segue a descrição do lineamento como falha, dando origem aos dois segmentos lineares N-S, e a outra interpretação leva em consideração um possível movimento na direção NE-SW do lineamento, o que seria resultado de fragmentações nesta mesma direção. O que ambas as interpretações têm em comum é que descrevem a região como a sobreposição de anomalias magnéticas.

Outra contribuição do produto ASA + ISA (fig. 6.4) é a melhora na visualização dos lineamentos à nordeste do mapa. A combinação evidenciou os lineamentos, tornando mais claros os seus limites e melhorando o entendimento destes lineamentos como possíveis camadas.

O mapa dos lineamentos magnéticos interpretados (fig. 6.5) permite reconhecer potenciais domínios magnéticos. Nele estão separadas por cor as direções das estruturas lineares. Em vermelho estão representados os lineamentos com tendência NE-SW, em azul os lineamentos de direção N-S e em preto, os lineamentos NW-SE, que se mostram predominantes na região.

6.2.3 Caracterização dos Domínios Magnéticos

De acordo com os estudos do campo magnético anômalo (fig. 6.1) e as diferenças apontadas para as assinaturas que formam o relevo magnético mapeado, procurou-se representar o que seriam os domínios magnéticos presentes na área de estudo. O campo magnético anômalo e suas transformações foram utilizados neste propósito.

O sinal magnético possui comprimentos de onda e frequências espaciais provenientes de diferentes profundidades. Sendo assim, através da análise espectral foi possível visualizar e separar as fontes magnéticas em faixas de profundidade e gerar produtos mais regionais (fontes mais profundas) ou residuais (fontes mais rasas).

O espectro de potência da área de estudo é mostrado na figura 6.6. Ele indica a presença de três faixas de profundidades, descritas da esquerda para direita, das possíveis fontes magnéticas. A primeira parte, **reta 1**, representa fontes mais profundas (infracrustais), com média de 8 km de profundidade, e correspondem aos maiores comprimentos de onda nos mapas. A segunda parte, **reta 2**, mostra as fontes intracrustais, com comprimentos de onda intermediários e profundidades médias de 2 km. A terceira parte, **reta 3**, corresponde a fontes supracrustais com profundidades em torno de 1 km.

Esta representação indica que as fontes magnéticas de alta frequência podem estar ligadas ao grupo de fontes mais superficiais, enquanto os outros grupos aos de fontes intermediárias e profundas.

A partir desta análise foram gerados mapas regionais, residuais e com profundidades intermediárias usando como base os pontos de intersecção das retas interpretadas do espectro de potência.

Sendo assim, para estudar o comportamento do campo magnético ligado às fontes profundas, foi feita uma filtragem do tipo passa-baixa (fig. 6.7), enfatizando o relevo magnético pelos maiores comprimentos de onda.

A figura 6.8 mostra o resultado da filtragem com as anomalias geradas pelas fontes profundas e a separação em domínios magnéticos. O produto da filtragem é o mapa regional (à esquerda) e, com este, foi possível observar a ocorrência de duas zonas de forte susceptibilidade magnética, onde uma das zonas apresenta três núcleos. O mais intenso destes se localiza na região da anomalia magnética sudeste da área de estudo, que possui lineamentos NE-SW. Logo, é plausível inferir que, nesta região, a geologia pode estar relacionada a um evento intrusivo com magnetização.

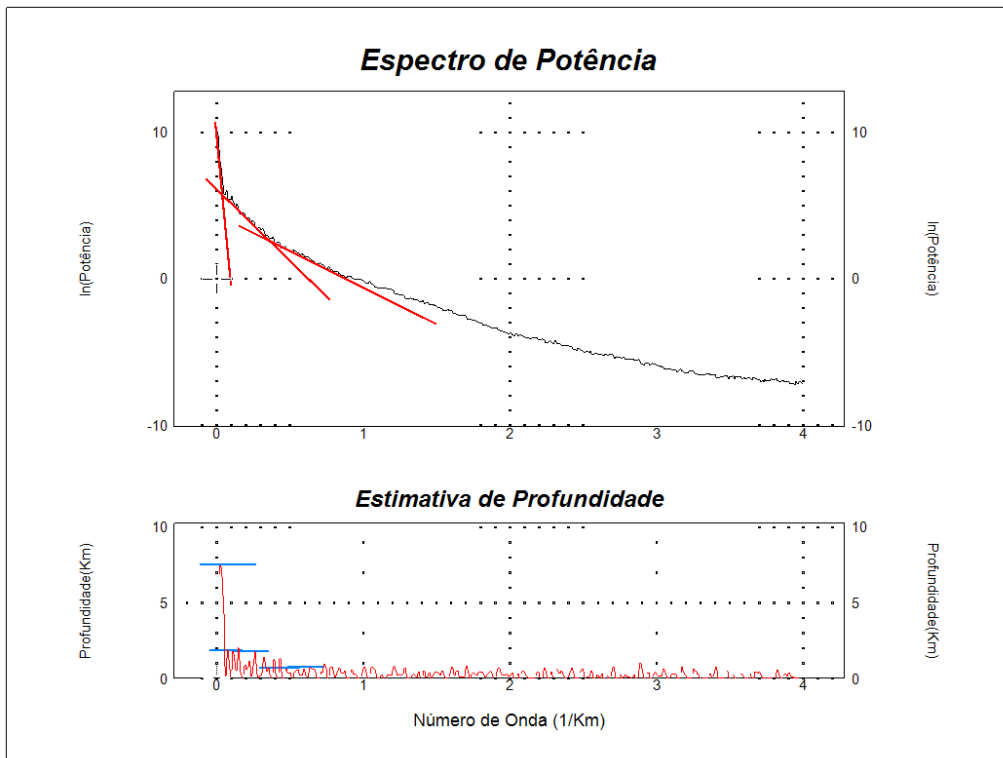


Figura 6.6: Espectro de potência ponderado radialmente para o CMA. Fonte: Autora.

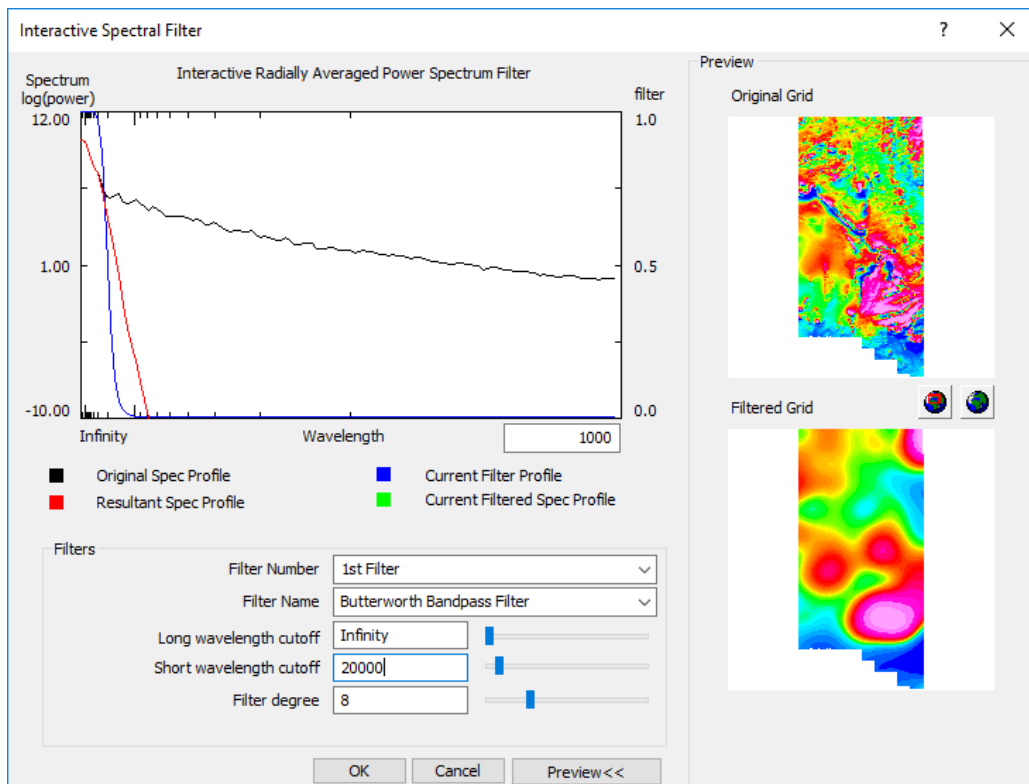


Figura 6.7: Aplicação do filtro passa-baixa. Fonte: Autora.

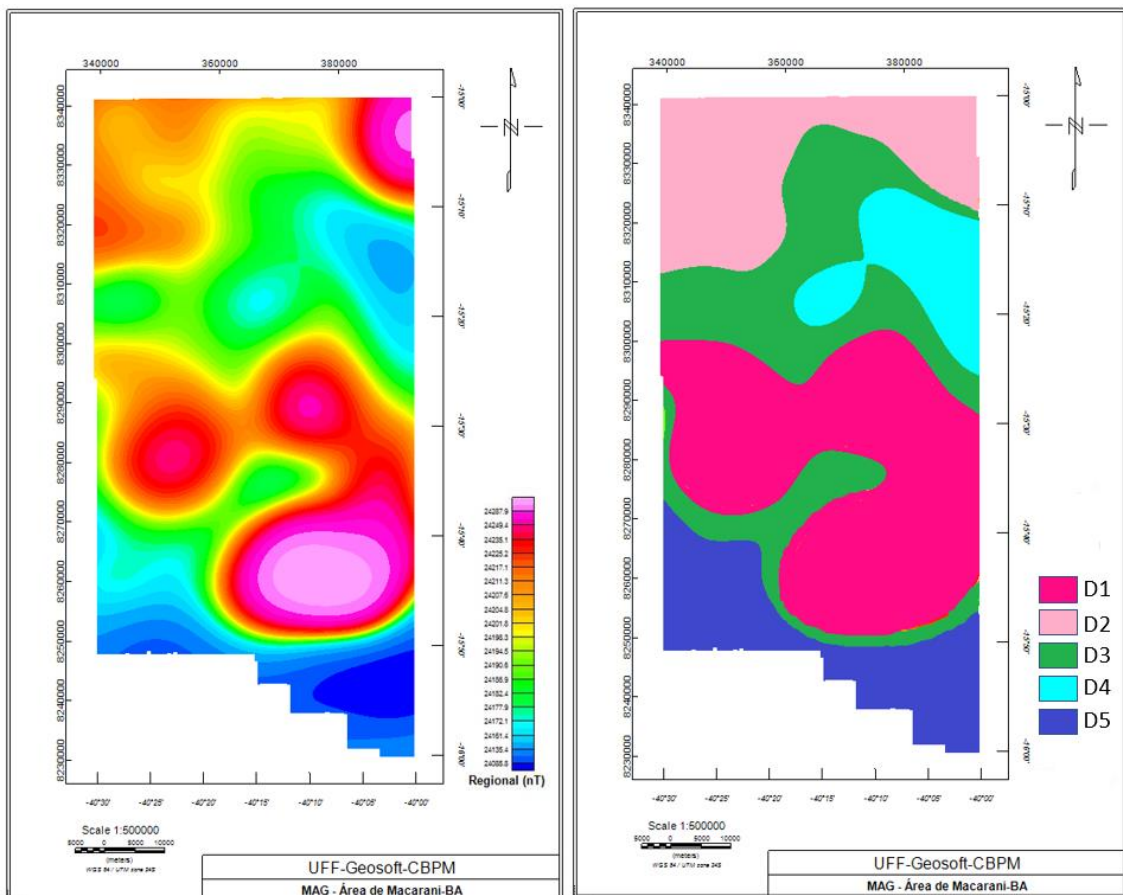


Figura 6.8: Mapa regional e domínios magnéticos interpretados a partir das fontes profundas.
Fonte: Autora.

Entre as zonas de maior intensidade do sinal, nota-se um decaimento na intensidade do campo magnético, gerando novas assinaturas, como as duas regiões de baixos magnéticos. A partir destas observações foram definidos cinco domínios magnéticos, que foram separados em cores como no mapa à direita da figura 6.8.

D1: O domínio magnético 1 é representado por assinaturas de muito alta intensidade magnética que ocupa toda a região central do mapa.

D2: O domínio 2 é composto por assinaturas de intensidade intermediária a alta.

D3: Caracteriza-se por assinaturas médias e tem grande extensão de área. Bordeja os domínios D1 e D2.

D4: O domínio mostra uma zona de baixos valores de intensidade magnética.

D5: É caracterizado como uma área de intensidade muito baixa e este comportamento também é observado nos mapas com altas frequências, ou seja, nas feições mais rasas.

Como foram interpretados três comportamentos distintos no espectro de potência, foram obtidos três produtos derivados da filtragem sugerida pela interpretação. Os mapas provenientes das baixas frequências foram exibidos acima e, a seguir, serão apresentados os mapas com as frequências intermediárias, ou seja, obtidos através de um filtro passa-banda (fig. 6.9) usado para a confecção dos mesmos.

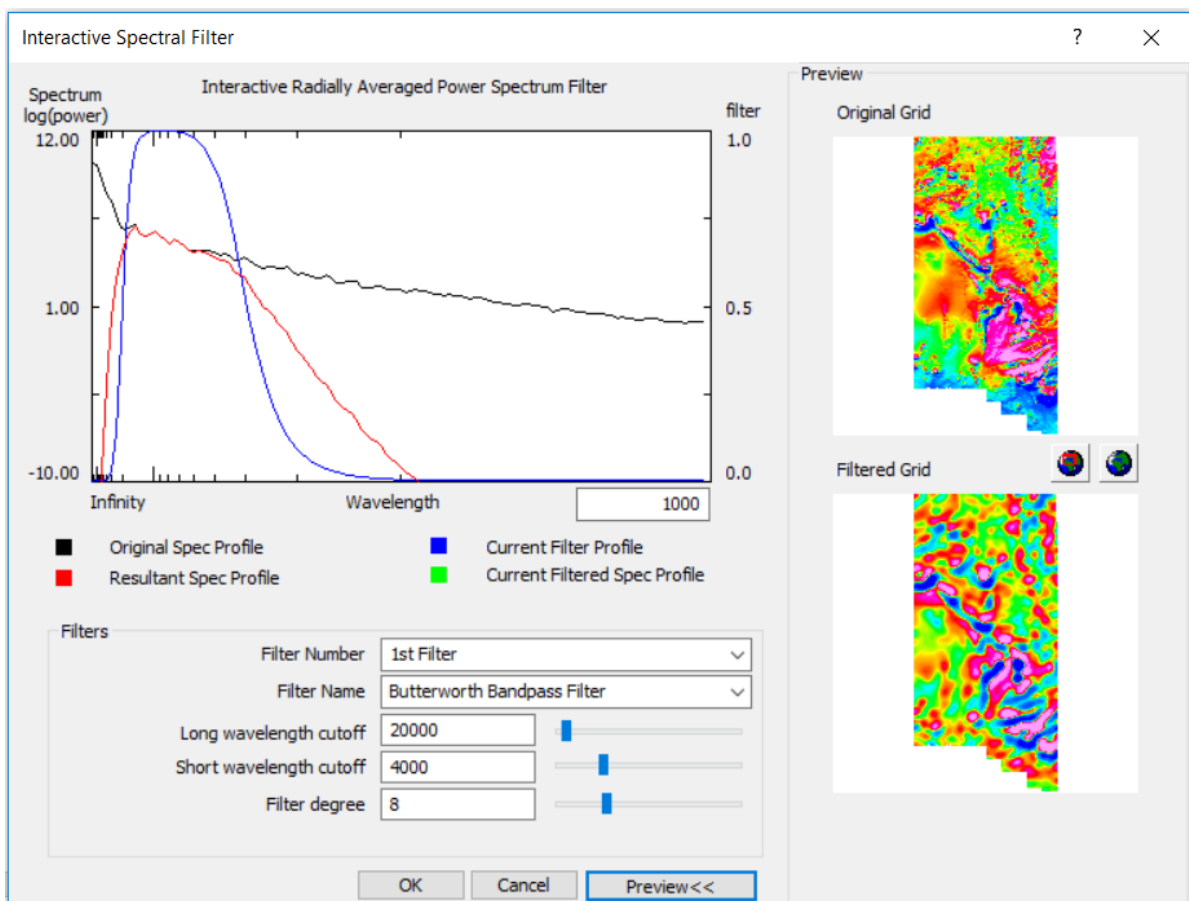


Figura 6.9: Aplicação do filtro passa-banda. Fonte: Autora.

No mapa representado na figura 6.10 é possível notar o surgimento de alguns lineamentos magnéticos já observados nos mapas com conteúdo de alta frequência apresentados anteriormente. É possível observar, também, a existência de novas anomalias de comprimentos de onda intermediários e alta intensidade magnética sobreposta à zona de baixo magnético mostrada no mapa regional.

Através da interpretação em domínios magnéticos (à direita da fig. 6.10) é possível observar, com a combinação de rosa escuro e azul, o aparecimento dos lineamentos NW-SE, como interpretados na figura 6.5, mas a ausência dos lineamentos N-S, o que pode contribuir para o entendimento de que os lineamentos N-S são eventos mais recentes na área de estudo.

A separação em domínios magnéticos (fig. 6.10) pode ser descrita da seguinte forma:

D1: Este domínio está associado ao domínio D4 devido ao comportamento dipolar das anomalias, e apresenta dois lineamentos bem marcados de alta intensidade magnética.

D2: O domínio 2 é caracterizado por intensidades magnéticas que variam de intermediárias a altas.

D3: É caracterizado por assinaturas intermediárias e tem grande extensão.

D4: O domínio mostra assinaturas de baixos valores de intensidade magnética.

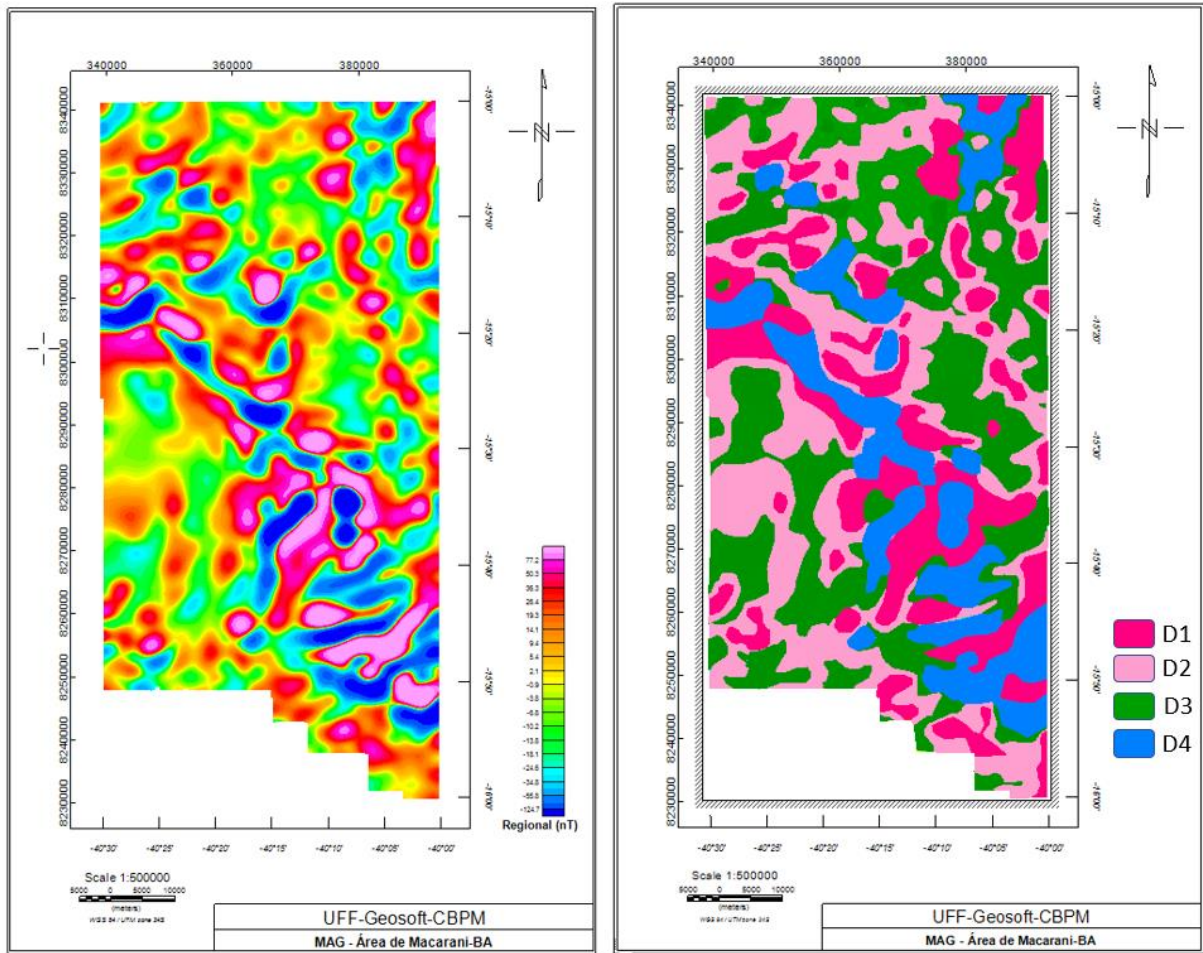


Figura 6.10: Mapa com frequências intermediárias e domínios magnéticos interpretados.
Fonte: Autora.

Os próximos mapas foram gerados através da aplicação do filtro passa-alta (fig. 6.11), mostrando o conteúdo residual, decorrente das fontes mais rasas. O mapa residual foi posteriormente comparado ao do produto do filtro da diferença da continuação ascendente, que também mostra anomalias mais rasas.

O mapa residual (fig. 6.12) destaca a feição linear NW-SE e mostra continuidade até a estrutura de igual intensidade magnética a sudeste. Com a interpretação dos domínios magnéticos, à direita da imagem, foi possível a identificação de quatro zonas de características distintas. Uma destas zonas se destaca pela assinatura magnética diferenciada, onde é possível observar uma certa homogeneidade no sinal que é de menor intensidade. Esta zona está representada pela cor azul no mapa.

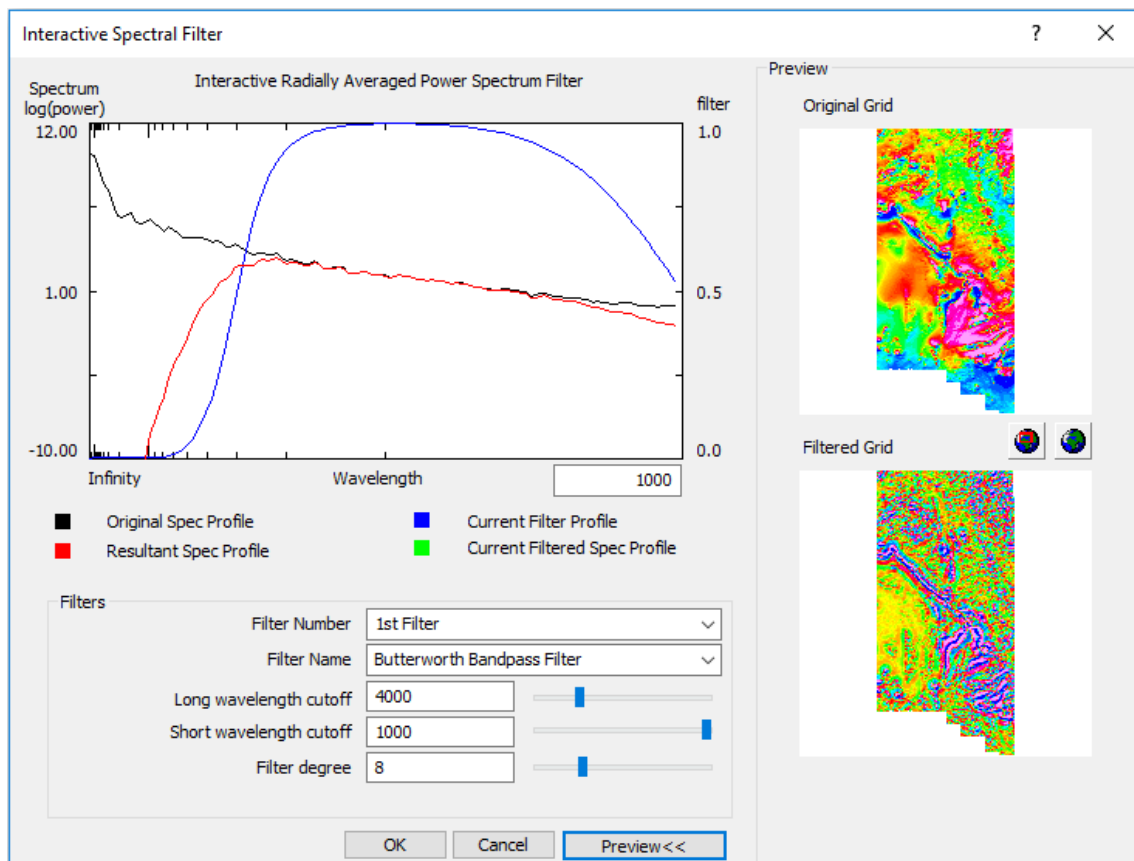


Figura 6.11: Aplicação do filtro passa-alta. Fonte: Autora.

As zonas interpretadas como domínios magnéticos no mapa residual podem ser caracterizadas como:

D1: O primeiro domínio é caracterizado pela maior intensidade magnética e abrange uma faixa NW-SE do mapa.

D2: Este domínio tem características similares ao domínio D1 quanto a intensidade, mas se mostra mais rugoso. Poderia estar associado a menores comprimentos de onda, ou seja, maiores frequências, o que pode gerar a possibilidade de ruídos.

D3: O domínio 3 tem comportamento de *background*, se estende por todo o mapa se relacionando com os demais domínios.

D4: Este domínio tem uma assinatura peculiar, mostrando uma zona mais homogênea em relação à rugosidade das demais. Também é uma região de anomalias negativas.

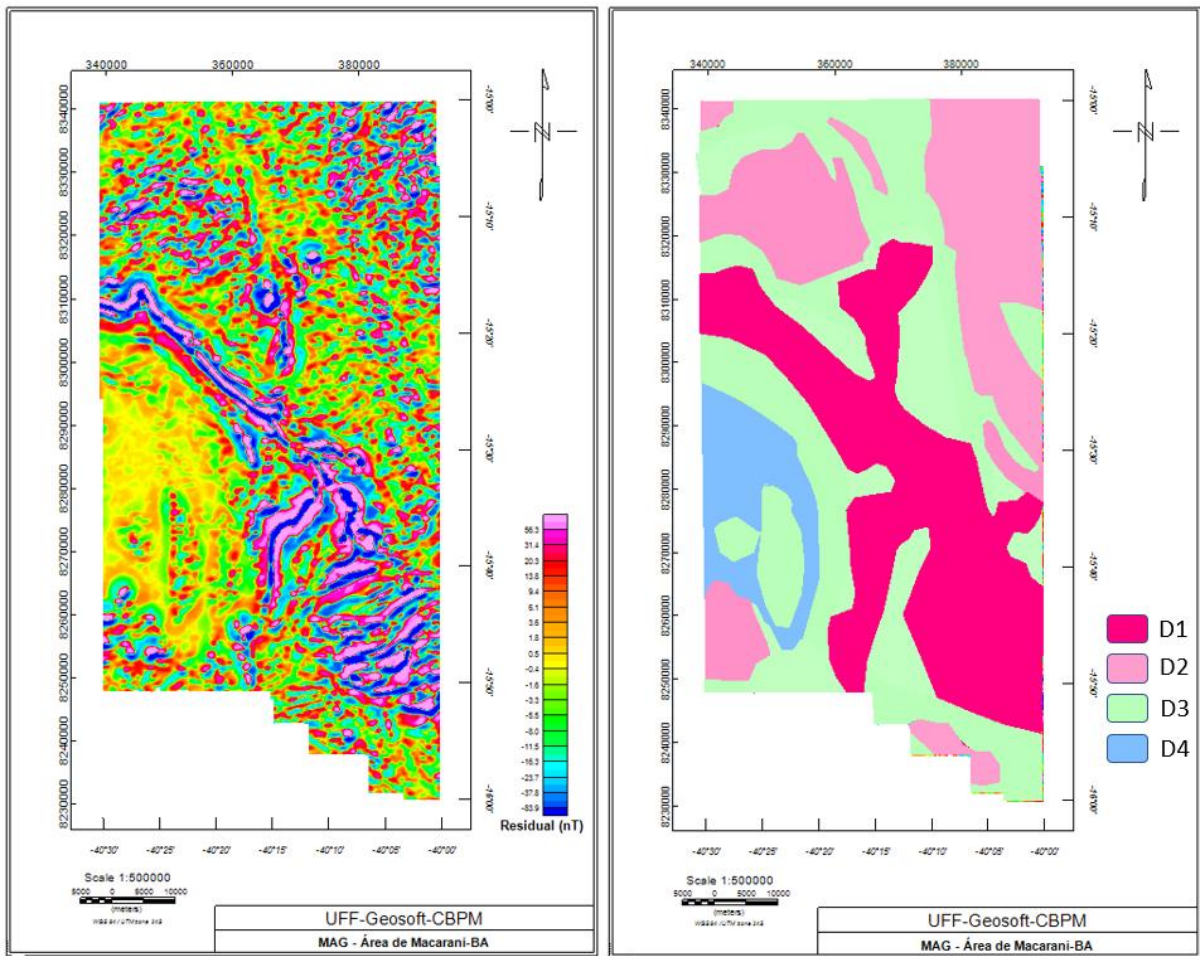


Figura 6.12: Mapa residual e domínios magnéticos interpretados a partir de fontes rasas.
Fonte: Autora.

Comparando o mapa residual com o produto da diferença da continuação ascendente (fig. 6.13), que também é um filtro passa-alta, é possível identificar as mesmas estruturas e feições, corroborando com os resultados da separação regional-residual feita a partir da análise do espectro de potências.

O domínio magnético residual identificado acima como D4 se destaca em ambas as imagens e, a partir da plotagem das ocorrências minerais de grafita obtidas de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para a região de estudo (representadas pelo X vermelho), nota-se a coincidência das mesmas com o domínio mencionado.

Relacionando esse resultado com as características dos demais mapas, é possível concluir que esta região do domínio D4 é uma área de anomalias magnéticas negativas, o que faz sentido, visto que a grafita é um mineral com valores baixíssimos de susceptibilidade magnética (-200 a -80×10^{-6}).

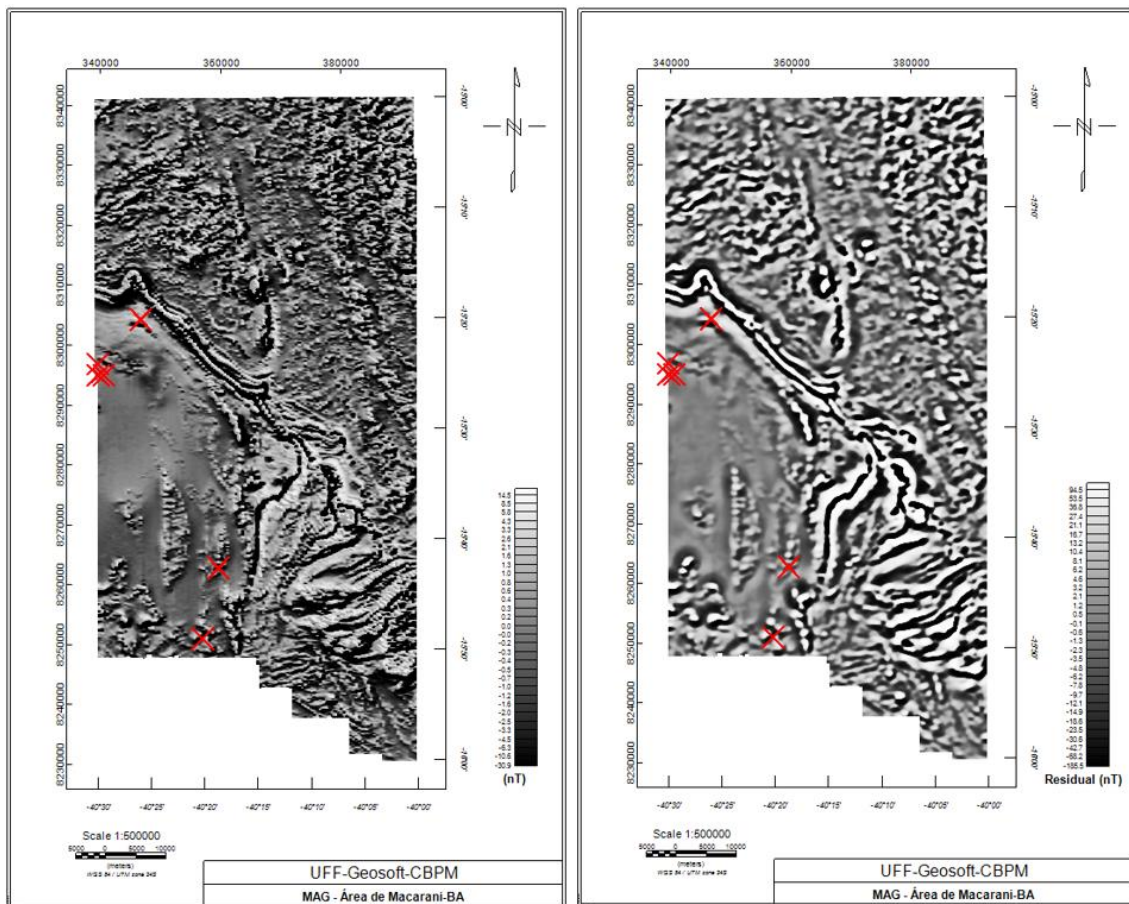


Figura 6.13: Comparação dos mapas residual e diferença da continuação ascendente com ocorrências de grafita. Fonte: Autora.

Logo, a área denominada como D4 é uma região de interesse para o alvo exploratório em questão. E a partir das interpretações de gamaespectrometria, receberá maior atenção.

6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

A interpretação da aerogamaespectrometria deve ser feita levando em consideração os processos que controlam a distribuição dos radioelementos em rochas e solos para o realce e processamento dos dados. Esse processo de interpretação é apoiado pelo uso de sistemas de informações geográficas com atributos de processamento de imagens, permitindo a integração de dados aerogamaespectrométricos com outros tipos de dados, como, por exemplo, o modelo digital de terreno (MDT).

Os temas gerados e analisados foram as imagens dos canais de Tório

(Th), Urânio (U) e Potássio (K), individualmente e em relação ao MDT, com a intenção de estudar a influência do relevo e das drenagens sobre os dados. Também foram analisadas as imagens das razões de Th/U, U/K e Th/K e suas correlações com as regiões onde estão mapeadas as ocorrências de grafita da área de estudo e a imagem composta RGB (K-Th-U) para definir unidades. O mapa litoestrutural geofísico também foi produzido, mas por não ter gerado resultados satisfatórios não será apresentado a frente.

6.3.1 Modelo Digital de Elevação de Terreno

A análise das respostas radiométricas mostrou que o relevo do modelo digital de elevação de terreno (fig. 6.14) tem influência nas interpretações das respostas no mapa. A topografia mais elevada, variando de marrom a branco na imagem, normalmente tende a concentrar o elemento tório, enquanto que o potássio tende a se concentrar nas encostas. Já nos vales e leitos de rio tem-se uma contagem radiométrica mais baixa, com concentrações principalmente de urânio e potássio, devido à maior mobilidade destes elementos (Figueiredo, J. B., 2006).

6.3.2 Potássio

O mapa do canal de potássio (fig. 6.15-a) mostra áreas com concentrações anômalas do radioelemento ^{40}K , principalmente observadas à norte do mapa e na região sudeste. Também são notadas altas concentrações na estrutura de direção N-S à sudoeste e na drenagem da área.

Quando comparadas, a imagem do canal de potássio com a do MDT, é possível observar as maiores concentrações deste radioelemento nas regiões de morros e platôs, assim como em suas proximidades (encostas). A única anomalia que foge à regra é a concentração de potássio do SE, que se encontra, boa parte, em região de baixo topográfico (fig. 6.15-b). Isto poderia ser explicado como uma característica litológica, visto que nesta área foi cogitada a presença de intrusões. A moderada presença do potássio nas drenagens mostra que o elemento sofreu certa lixiviação.

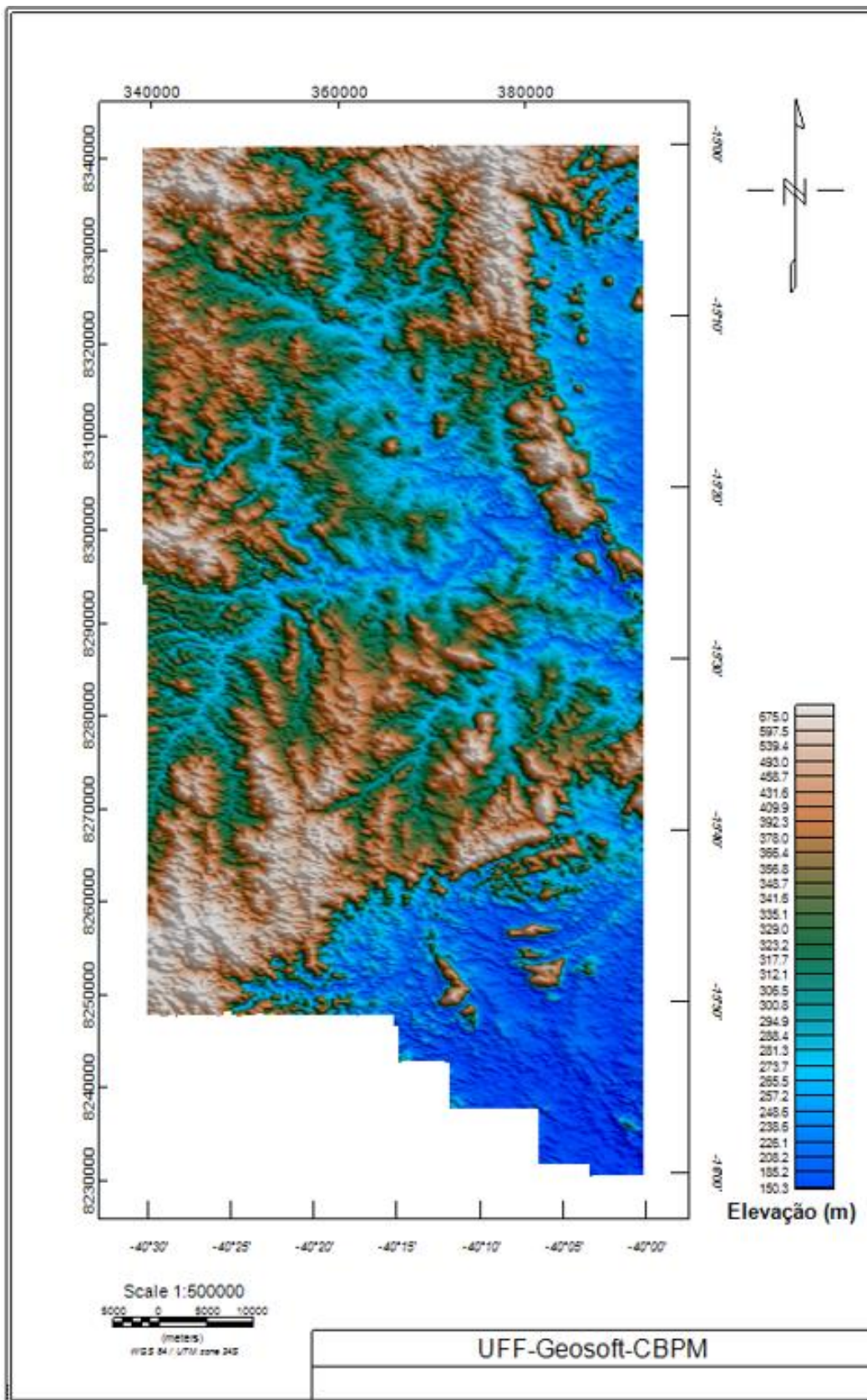


Figura 6.14: Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDT). Fonte: Autora.

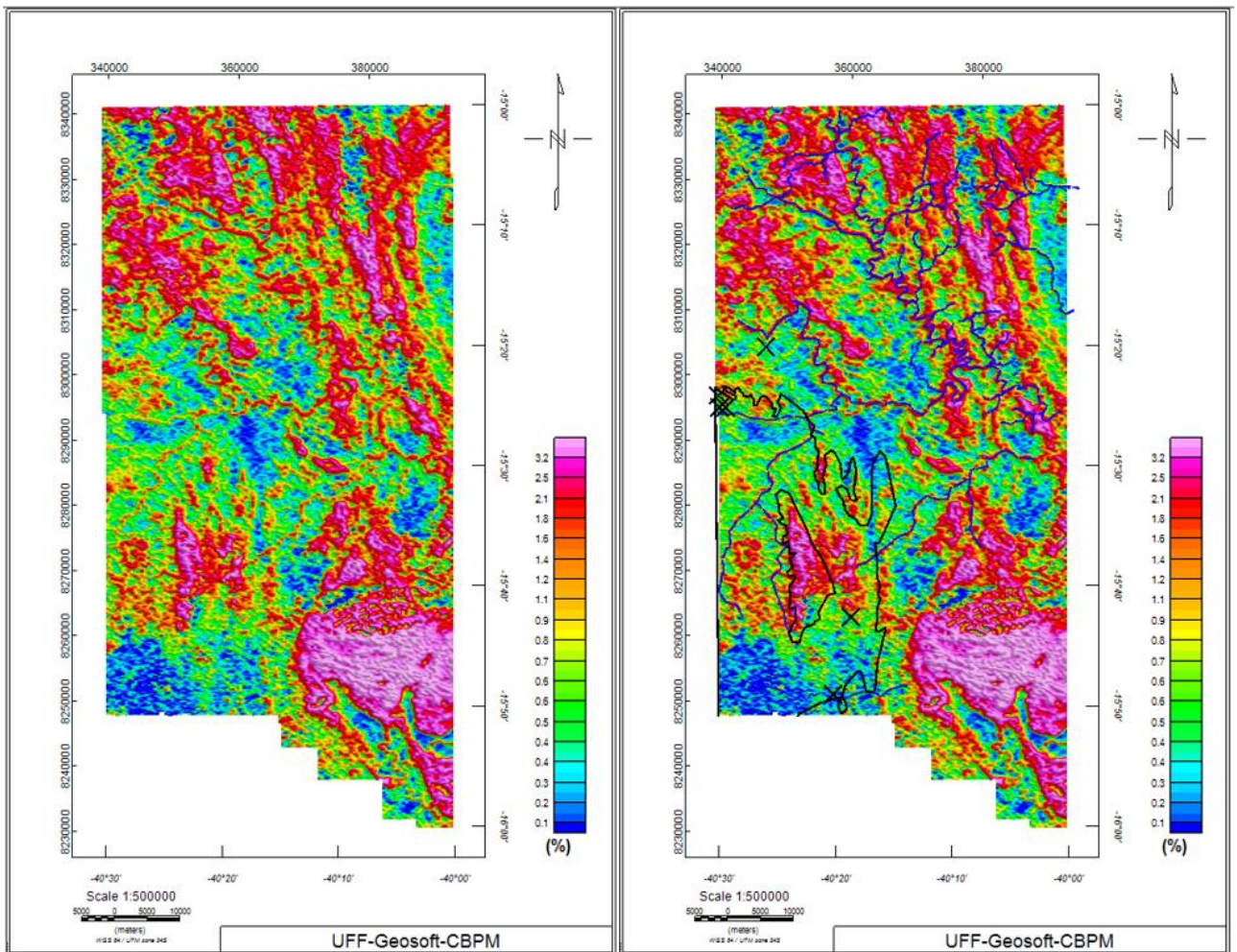


Figura 6.15 (a): Canal de Potássio (^{40}K) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.

A imagem também mostra lineamentos, já observados com a magnetometria, na região nordeste do mapa com direções NW-SE e menor concentração do elemento na região de interesse definida anteriormente (fig. 6.15-a).

6.3.3 Urânio

O canal de urânio é o mais desafiador em relação à sua interpretação por conta da alta mobilidade do elemento. Analisando o mapa (fig. 6.16) é possível notar sua forte presença nos rios. A drenagem da região foi plotada sobre o mapa para ajudar na visualização.

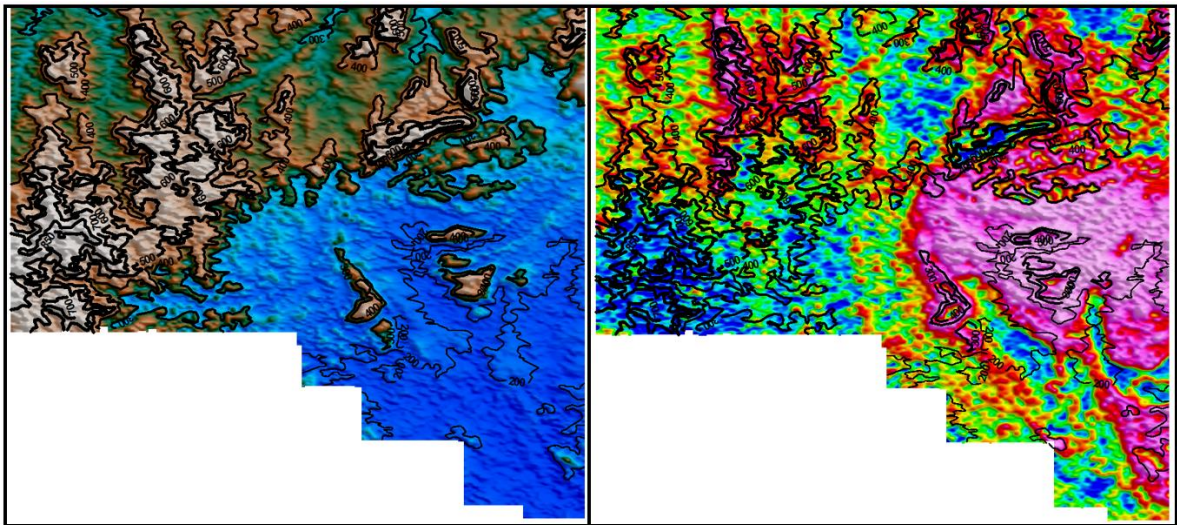


Figura 6.15 (b): Comparação das imagens de MDT (à esquerda) e canal de potássio (à direita) com representação das curvas de nível para correlação das respostas com a topografia. Fonte: Autora.

Seguindo com a interpretação, percebe-se uma alta concentração do radioelemento ^{238}U na região de interesse para identificação do mineral grafita, fortalecendo a hipótese de possível depósito do minério, já que colabora com as características geológicas que serão integradas às interpretações geofísicas a frente no estudo. Também é notada sua forte presença na litologia com assinatura magnética de direção NW-SE e na região sudeste do mapa.

6.3.4 Tório

A partir da imagem do canal de tório (fig. 6.17) foi possível mapear as regiões de alta concentração do radioelemento ^{232}Th e sua relação com o relevo. Ainda que seja conhecido por sua pouca mobilidade, foi observada certa concentração do elemento nas drenagens, resultado da lixiviação.

Algumas regiões apresentaram concentrações consideráveis de tório, como a própria área alvo de grafita, a feição lenticular N-S e outros lineamentos de mesma direção, uma porção da região sudeste, a feição NW-SE da região central do mapa, e os lineamentos à nordeste. Estes últimos foram particularmente mais detalhados com o canal.

Sobrepondo o mapa de tório com o modelo digital de elevação de terreno

foi possível notar a relação do radioelemento ^{232}Th com o relevo, mostrando que as zonas de maiores elevações coincidem com as altas concentrações do elemento ao longo de toda a extensão do mapa, mostrando sua maior resistência ao intemperismo e erosão.

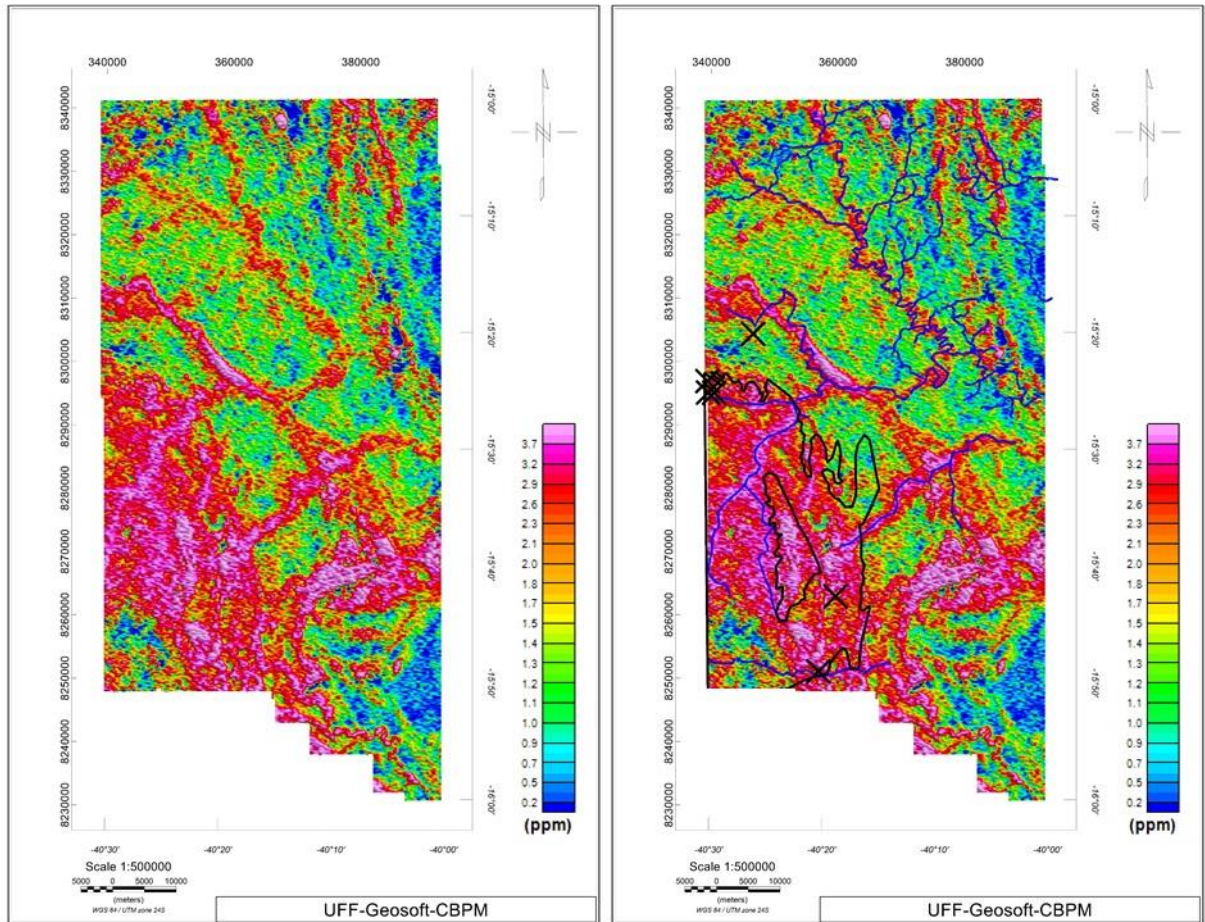


Figura 6.16: Canal de Urânio (^{238}U) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.

6.3.5 Mapa Ternário

O mapa ternário foi produzido através da composição RGB (fig. 6.18), na qual cada radioelemento foi atribuído a um canal de cor primária, onde, na imagem formada, cada pixel reproduz a tonalidade de cor que reflete os valores relativos de intensidade de radiação gama entre os três canais componentes.

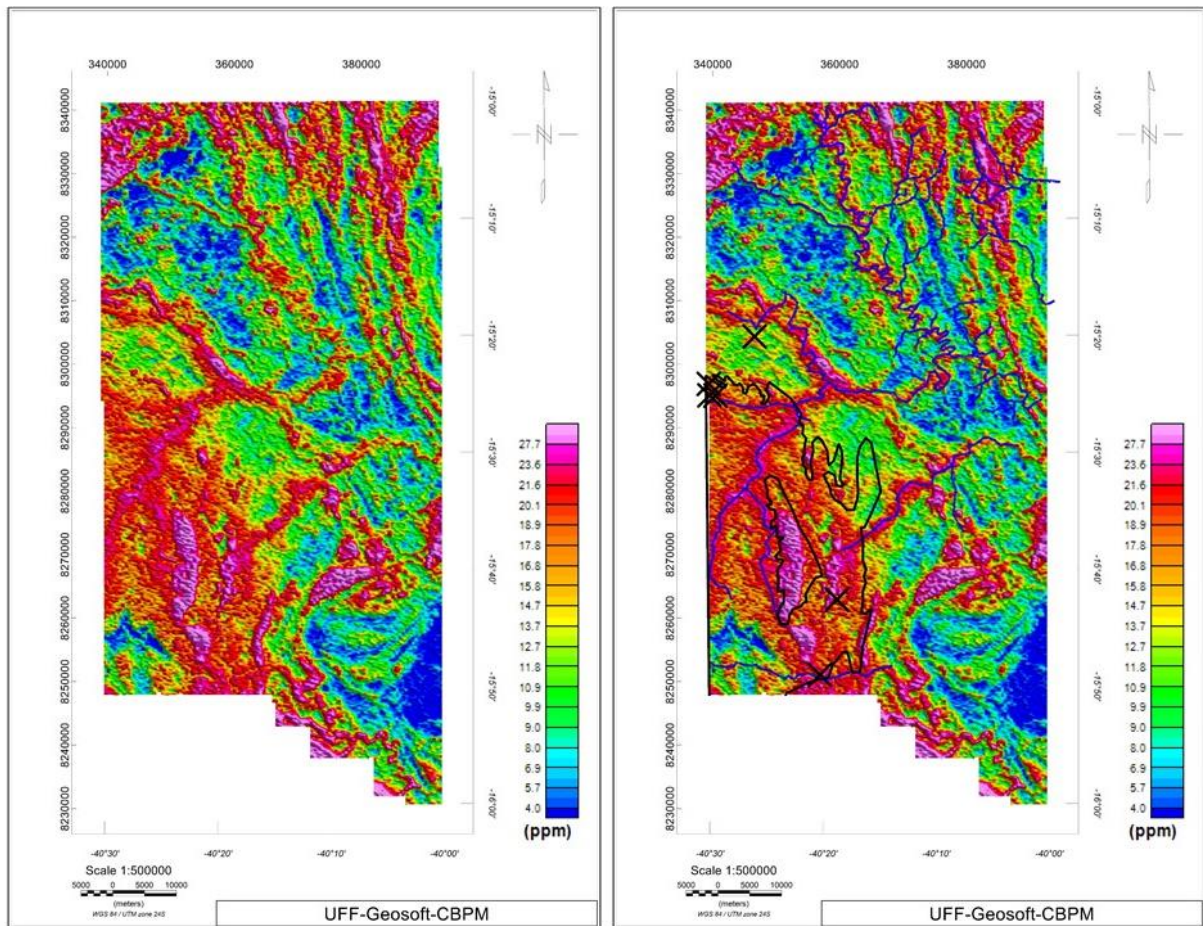


Figura 6.17: Canal de Tório (^{232}Th) e sua representação com a delimitação da área de interesse, ocorrências de grafita e drenagem. Fonte: Autora.

Nesta composição foi atribuída ao canal de potássio a cor vermelha, ao canal de tório a cor verde e ao canal de urânio a cor azul.

Este mapa é muito similar ao mapa geológico por conta das assinaturas radiométricas distintas de cada litologia e também por sua pouca penetração no solo, devolvendo informações rasas.

Observando o mapa, foi possível notar a concentração de radioelementos na drenagem, que se mostra esbranquiçada representando a junção dos três canais, mas também a predominância do tom azul, que representa o canal de urânio, mais móvel.

Também é notável o tom de verde azulado presente na área definida como de interesse, indicando a presença de tório e urânio, já vista nos mapas dos respectivos canais. Duas regiões de alta concentração de potássio também

ficam bem marcadas pelo mapa, assim como a feição lenticular com a presença dos três radioelementos.

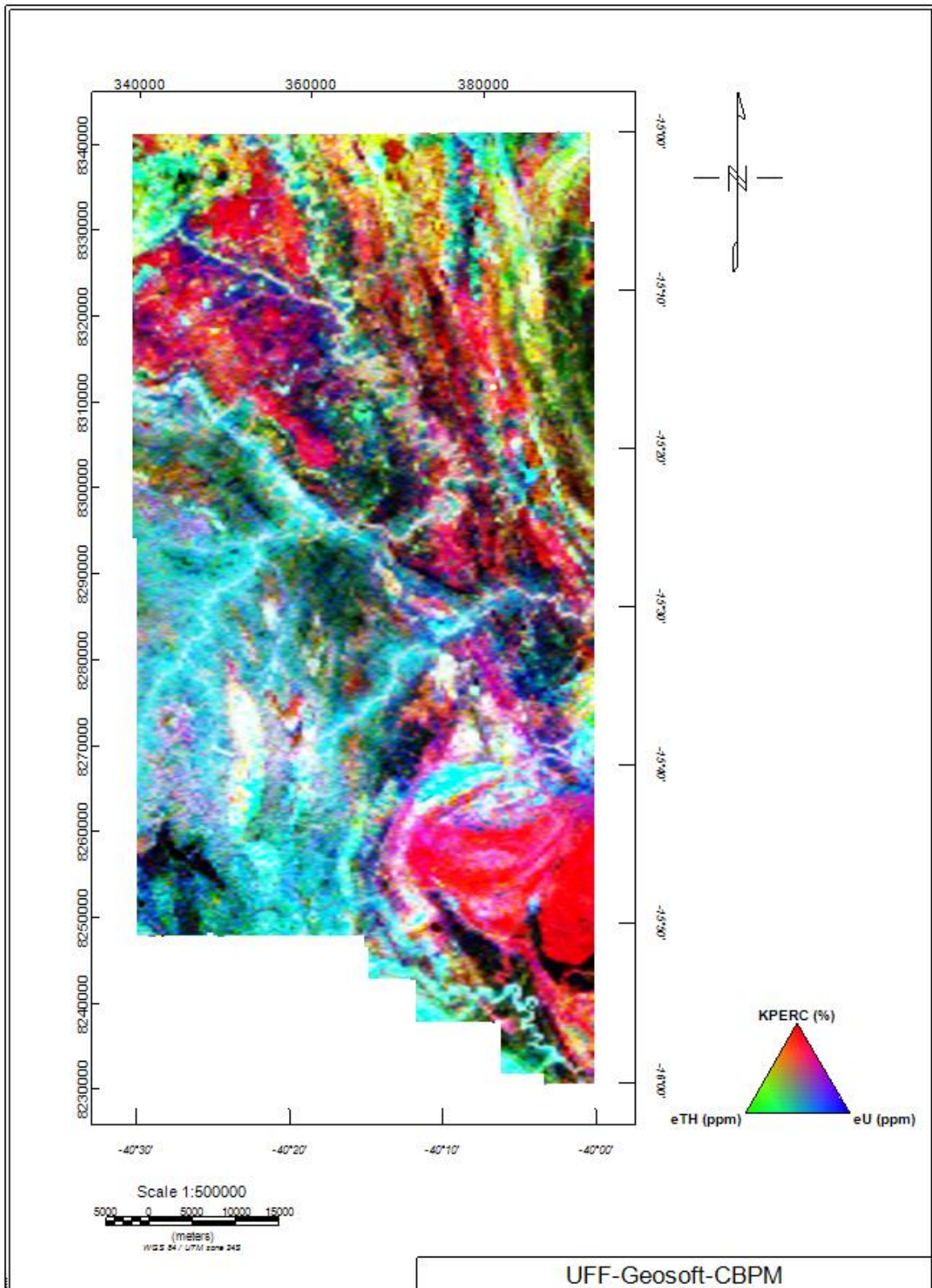


Figura 6.18: Mapa ternário com composição RGB. Fonte: Autora.

6.3.6 Razões Th/K, Th/U e U/K

As razões obtidas entre os canais são usadas para entender suas concentrações relativas e, sendo assim, serão apresentadas a seguir (figs. 6.19 e 6.20) e seguidas por suas respectivas interpretações.

Os mapas apresentados nas figuras 6.19-a e 6.19-b mostram as concentrações de urânio e tório em relação ao potássio. Como ambos exibem resultados bastante similares devido às altas concentrações de Th e U e baixas de K na região de interesse, as imagens são redundantes em relação aos mapas individuais de concentrações de U e Th.

Já o mapa da razão de Th/U (fig. 6.20) mostrou certo detalhamento da área, onde uma aparente intercalação da concentração de Th e U foi observada. Esta intercalação de tório e urânio pode ser interpretada como diferentes intensidades de aporte sedimentar ora com maior influência continental (aumento do Th), ora marinha (aumento do U) (Klaja & Dudek, 2016).

A interpretação do mapa da razão Th/U foi comparada com a do MDT (fig. 6.21) para a compreensão de sua relação com a topografia da área. Assim, foi possível observar a coincidência das maiores concentrações de tório com os altos topográficos, que já era de se esperar pela maior dificuldade deste radioelemento ser lixiviado. Além desta questão, outra colaboração da comparação dos mapas foi a observação da semelhança nas feições curvilíneas que se seguem na região.

Olhando para a interpretação das intercalações, à direita da imagem, notou-se também a interferência da drenagem no sinal, mostrando a maior concentração de urânio nos rios (valores baixos a médios de tório representados pela cor verde) cortando os lineamentos de tório. Mais à frente serão discutidas potenciais razões sobre esta intercalação entre valores com maiores concentrações de Th e U.

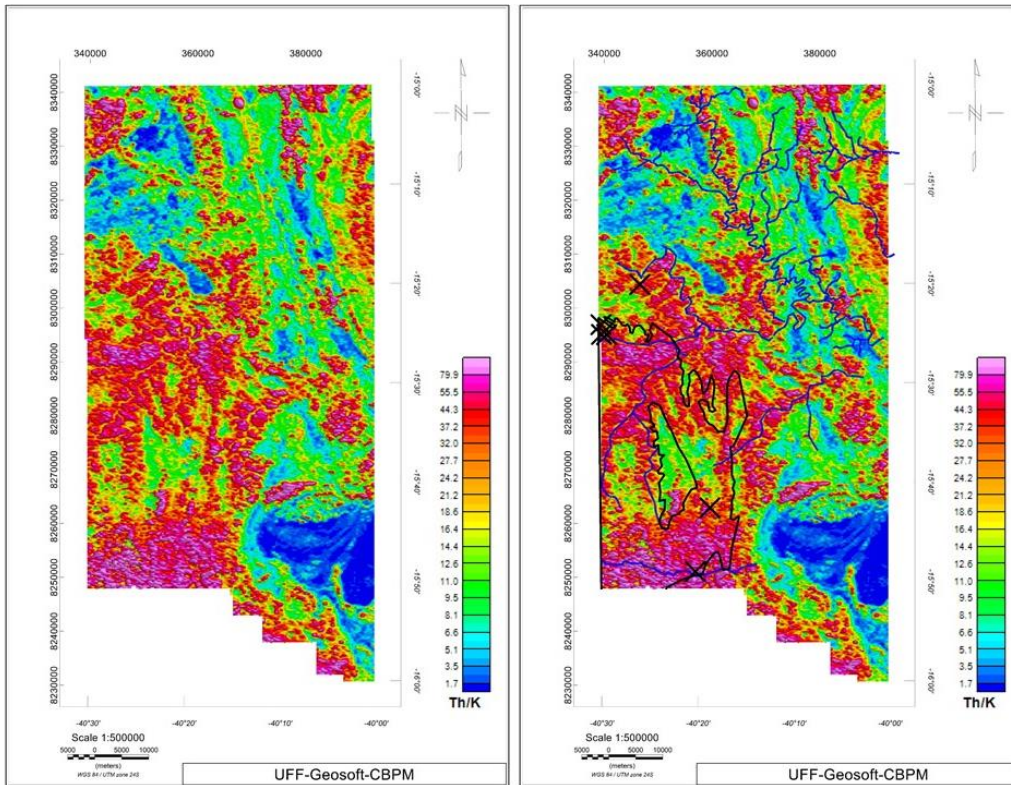


Figura 6.19 (a): Mapas com a razão Th/K e sua representação com a drenagem, área de interesse e ocorrências de grafita. Fonte: Autora.

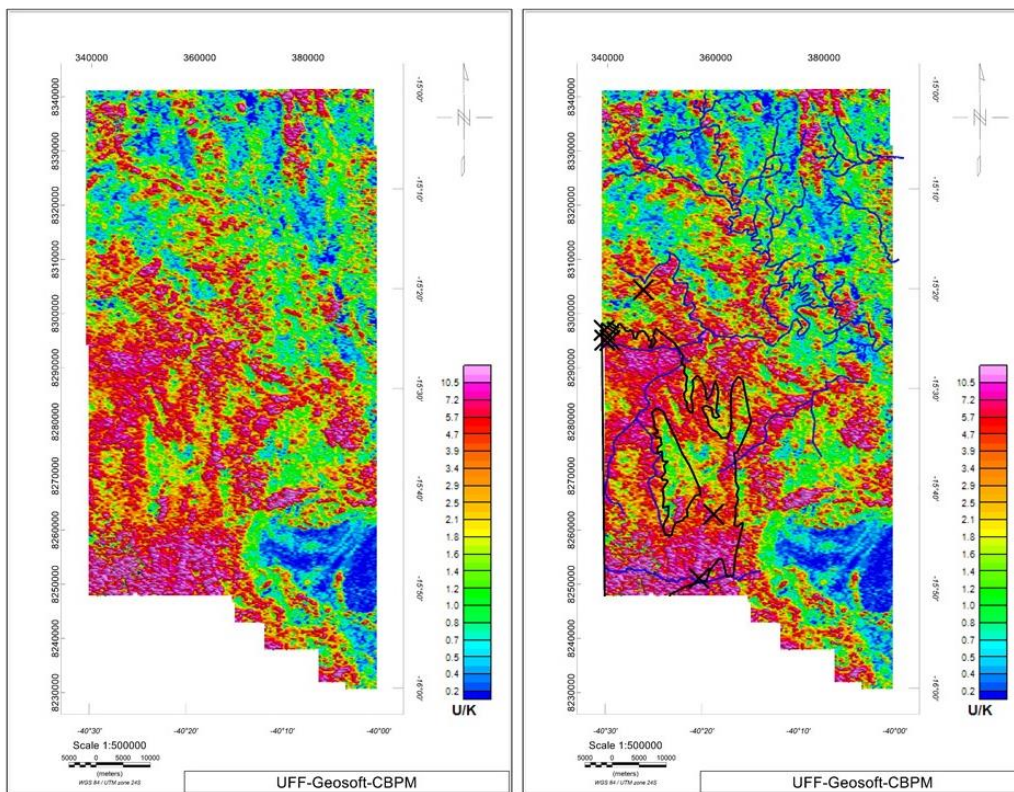


Figura 6.19 (b): Mapas com a razão U/K e sua representação com a drenagem, área de interesse e ocorrências de grafita. Fonte: Autora.

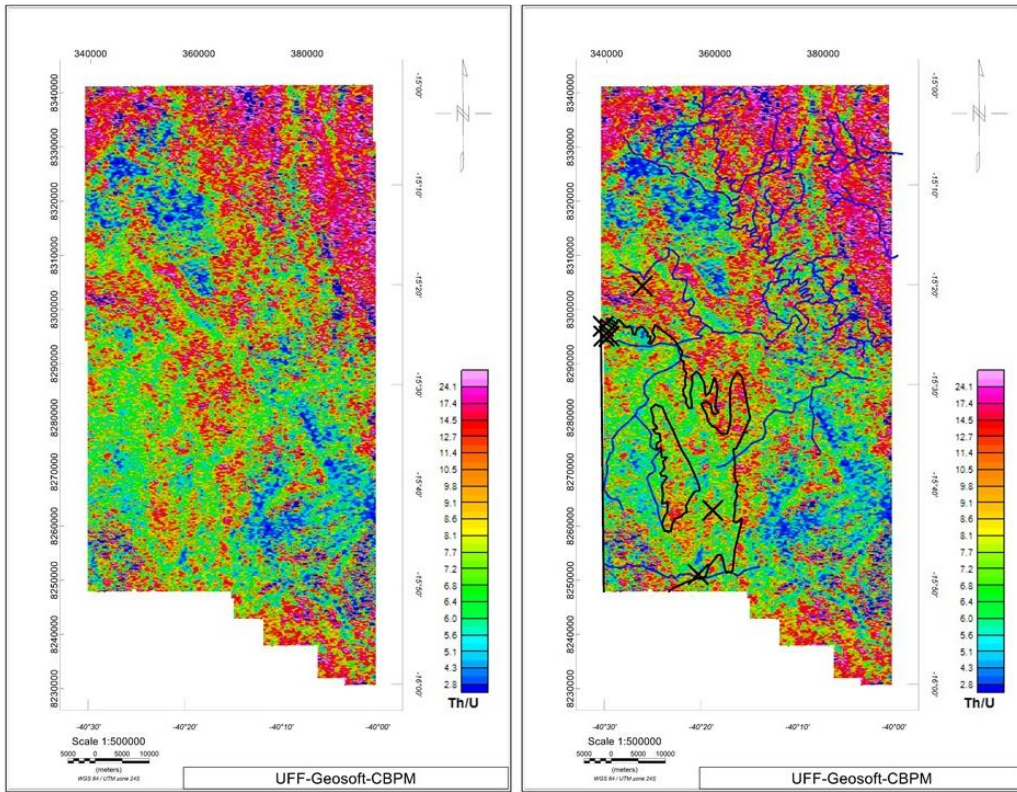


Figura 6.20: Mapas com a razão Th/U e sua representação com a drenagem, área de interesse e ocorrências de grafita. Fonte: Autora.

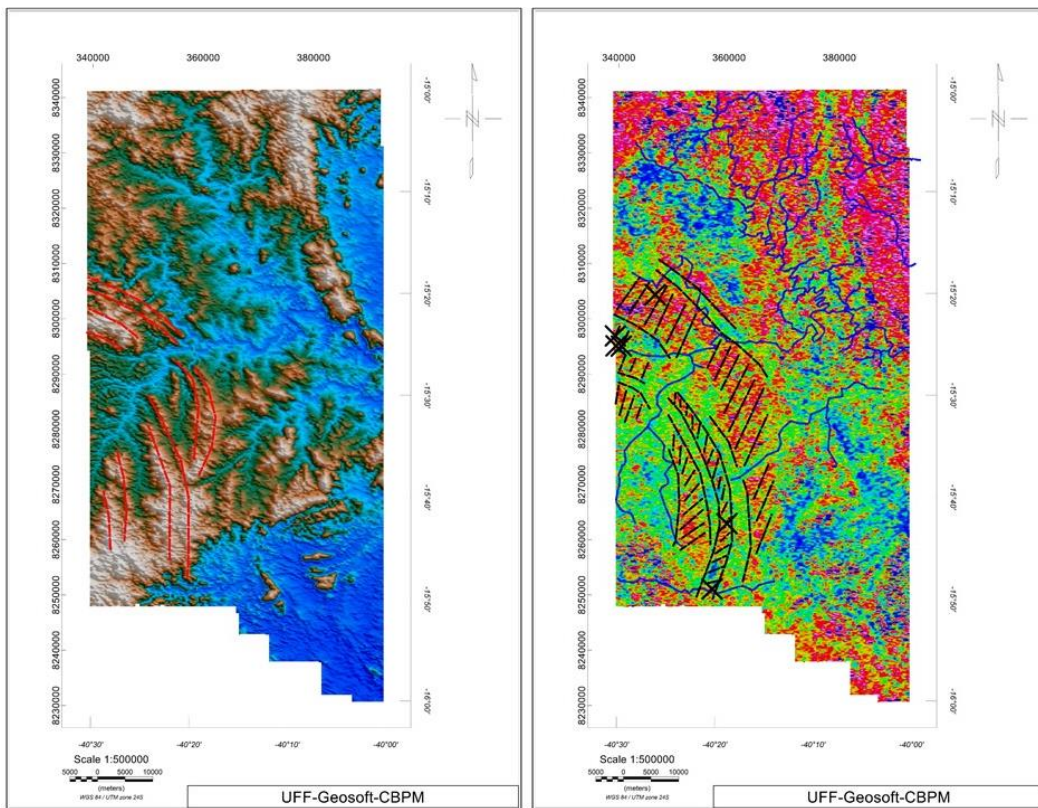


Figura 6.21: Comparação da topografia (à esquerda) com a interpretação das intercalações de Tório e Urânio (à direita) com as ocorrências de grafita. Fonte: Autora.

6.4 CLASSIFICAÇÃO NÃO SUPERVISIONADA

A classificação não supervisionada intitulada *Self Organizing Maps* - SOM, como já explicada anteriormente, é uma técnica de reconhecimento de padrão usada para encontrar grupos que ocorrem naturalmente num conjunto de dados de muitas variáveis. As regras de alocação de amostras nesses grupos (ou classes) são baseadas em alguma medida de distância no espaço dos dados.

Esta técnica permite criar esquemas de classificação qualitativa eficientes e delinear rapidamente as características de polígonos/áreas de interesse. Por se tratar de um sistema automatizado de classificação, classes são facilmente criadas ou modificadas. Sendo assim, foi possível testar diversas combinações de informações, visando definir as que melhor caracterizassem regiões com possíveis depósitos de grafita.

No algoritmo do SOM, implementado em linguagem Python, utilizado para a classificação foram ajustados parâmetros como o número de classes, definido como quatro devido ao baixo conteúdo de anomalias da região, gerando então quatro classes e quatro regiões de *background*, e a porcentagem de anomalias presentes na área, que pode ser ajustada de forma a melhorar a qualidade dos resultados do SOM.

Na figura 6.22 estão expostos os melhores resultados do SOM, juntamente com o *plot* das ocorrências de grafita da região. A imagem da esquerda mostra a correlação dos canais das razões Th/U e U/K, canal de tório, MDT e filtro da diferença da continuação ascendente. Estes canais foram utilizados pois, como visto anteriormente, com a interpretação da aerogamaespectrometria, os canais da razão de Th/U e o próprio tório geraram um bom resultado, assim como sua correlação com o relevo (MDT). Foi adicionado um elemento da aeromagnetometria, para verificar como este se comportava em relação à classificação, tanto que a imagem à direita mostra a classificação dos mesmos canais, menos o produto magnético, a fim de comparar sua influência.

É possível notar que ambas as classificações geraram uma classe (na cor verde, à esquerda, e amarela, à direita) que abrange todas as ocorrências de

grafita e que coincide com a área de interesse visualizada nos mapas, com a sutil diferença da presença de um elemento estrutural proveniente da magnetometria. Estes resultados ajudaram a tornar ainda mais críveis as soluções interpretadas a partir dos canais usados no SOM devido à assertividade da correlação.

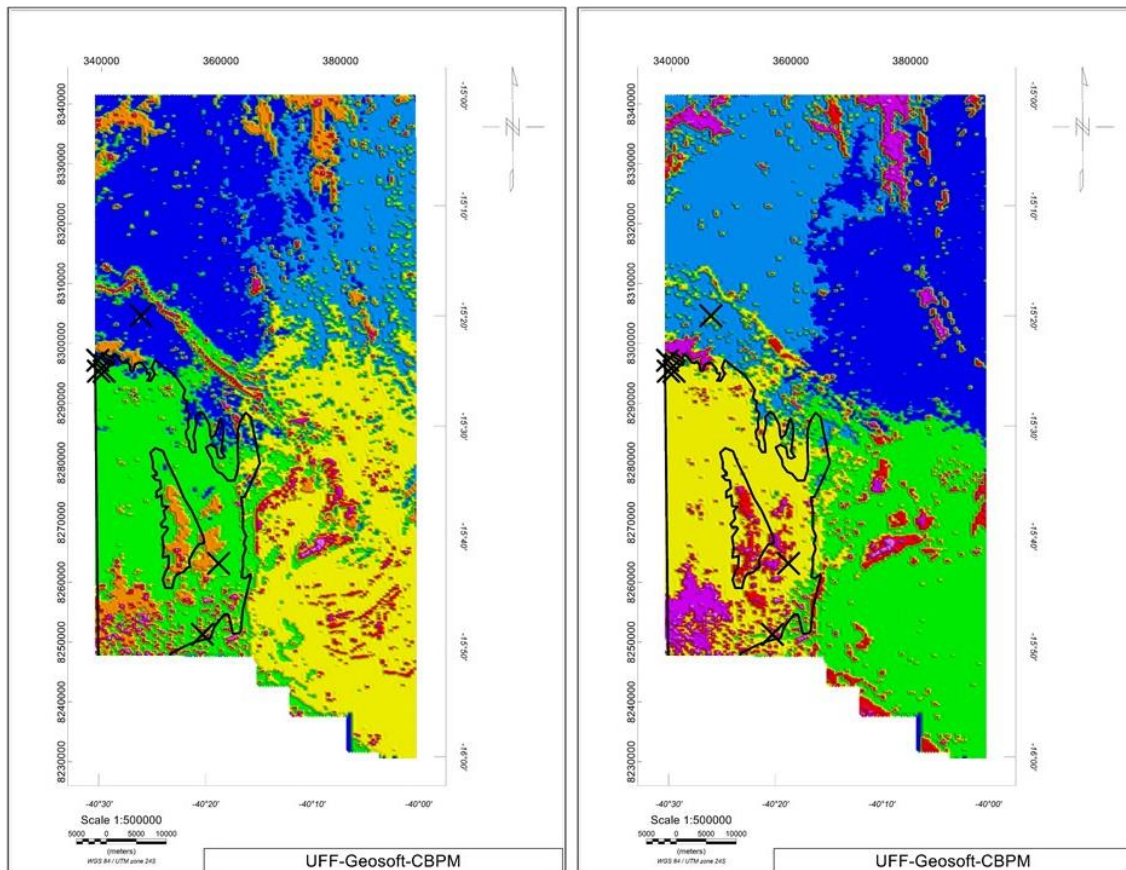


Figura 6.22: Mapas produzidos através da classificação automática SOM.

6.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS

Neste tópico será discutida a integração das interpretações dos dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria e sua junção com as informações geológicas disponíveis sobre a região da cidade de Macarani. A carta geológica é o documento que contém as principais informações sobre as unidades litológicas e estruturais e, neste trabalho, foi utilizada a do projeto Itapetinga-Canavieiras com escala 1:250.000 (apresentada no capítulo II, fig. 2.3-a), produzida pela CPRM em conjunto com a CBPM, que engloba a área de estudo.

É necessário ressaltar que as respostas ao método aeromagnetométrico são resultado da presença de minerais magnéticos, que são minerais acessórios às rochas presentes na área, e, portanto, para esta aplicação foi necessário se basear nas variações das intensidades magnéticas, visto que a grafita tem valores baixíssimos das mesmas. Os resultados da aerogamaespectrometria também estão restritos aos minerais que apresentam teores significativos de Potássio, Tório e Urânio, tais como K-feldspatos, micas, zircão, monazita, uraninita, etc, presentes em superfície, e, por isso, foi preciso trabalhar em constante comparação com as litologias apresentadas na região.

Como a partir da interpretação magnética foi possível a divisão do mapa em domínios magnéticos e estes mostraram uma possível área de destaque para a prospecção de grafita no domínio chamado de D4, que foi reforçada pela ocorrência do minério em determinados pontos deste domínio, esta região de interesse terá amplo destaque no presente tópico, sendo mencionadas apenas poucas estruturas e áreas além da citada.

A evidência recorrente aos mapas temáticos da magnetometria sobre a área alvo é a anomalia magnética negativa que coincide com sua extensão. Esta característica foi mostrada com mais clareza principalmente quando foi analisado o mapa residual, que exibiu um contraste bem grande entre esta região e as demais. O que mostra também que esta assinatura é decorrente de fontes rasas, já que, quando investigados, os mapas produzidos pelos filtros passa-baixa e passa-banda mostram intensa magnetização na área. Este resultado relacionado às profundidades é atestado pela geologia que foi composta em contexto oceânico, onde a literatura sugere a presença da unidade metassedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha, com variedades de mica xisto, xisto grafitoso, rocha calcissilicática e diopsidito.

Buscando uma correlação com o método aerogamaespectrométrico, foi possível notar um comportamento anômalo tanto do tório quanto do urânio, que mostraram altas concentrações na área. Isto é fundamentado pela literatura visto que, segundo Flores (2014), o processo de grafitização, ou seja, formação do grafite, acontece quando a matéria orgânica, já em processo de alteração, é submetida a condições de temperatura e pressão associadas ao metamorfismo, mais especificamente entre as fácies xisto verde e fácies anfíbolito, que são observadas na região geradas ao longo da orogênese Araçuai (capítulo II).

A acumulação desta matéria orgânica se dá devido ao aporte sedimentar continental ou por sedimentação de material marinho, que também é comprovado pela presença da sequência ofiolítica. É no conteúdo orgânico que estão fixados os radioelementos citados, U e Th, e, segundo Klaja & Dudek (2016), olhando a razão Th/U (apresentada na fig. 6.20) é possível determinar o tipo de ambiente de sedimentação. Esta relação mostra que elevados valores da razão são típicos de ambiente continental, enquanto o contrário, de ambientes marinhos.

A intercalação de valores altos e baixos da razão, podem indicar variações do nível relativo do mar, com maiores concentrações de urânio em períodos de mar alto (retrogradação) e maiores concentrações de tório em períodos com maior aporte sedimentar (progradação) influenciado por condições de maior pluviosidade. Desta forma, é possível relacionar material orgânico continental proveniente de plantas terrestres durante as progradações e material orgânico oriundo de produtividade primária (fitoplâncton) durante as transgressões marinhas (Tissot & Welte, 2012).

Convém salientar a presença de condições anóxicas a sub-óxicas que permitiram a preservação da matéria orgânica que originou os depósitos de grafita da área em estudo, após submetidas às maiores condições de temperatura e pressão geradas durante o soterramento e posterior metamorfismo regional.

Observando o mapa de concentrações de tório (fig. 6.23) é possível notar que a maioria das ocorrências registradas pela CPRM se encontram na mesma faixa de alto de tório, indicando a mesma como um provável período onde foram geradas condições favoráveis para a formação do minério. Outro fator contribuinte para esta área ser um possível alvo é o fato de o tório ser pouco móvel, portanto, não há grande dúvida em relação à interpretação aerogamaespectrométrica devido à influência de relevo ou drenagem.

A ocorrência que se encontra mais ao norte da área, está inserida na Formação Chapada Acauã (mais antiga) e muito próxima à litologia definida como grafita-cianita xisto, que também possui as mesmas características em relação à razão Th/U e está localizada em um alto topográfico. Também está encaixada na área de baixa intensidade magnética, e, segundo o mapa da diferença da continuação ascendente, sobre uma anomalia negativa.

Algumas outras áreas fora da região de interesse se destacam por suas assinaturas diferenciadas, como a região sudeste, que, analisando as respostas do método aerogamaespectrométrico, mostrou resultados similares aos da área com as ocorrências, mas se encontra sobre um alto magnético, segundo os produtos da aeromagnetometria. Analisando o mapa geológico (fig. 2.3-a), esta área está sobre rochas intrusivas alcalinas, como nefelina sienito e fenito, ricas em feldspatos. Logo, não é um possível alvo para o estudo.

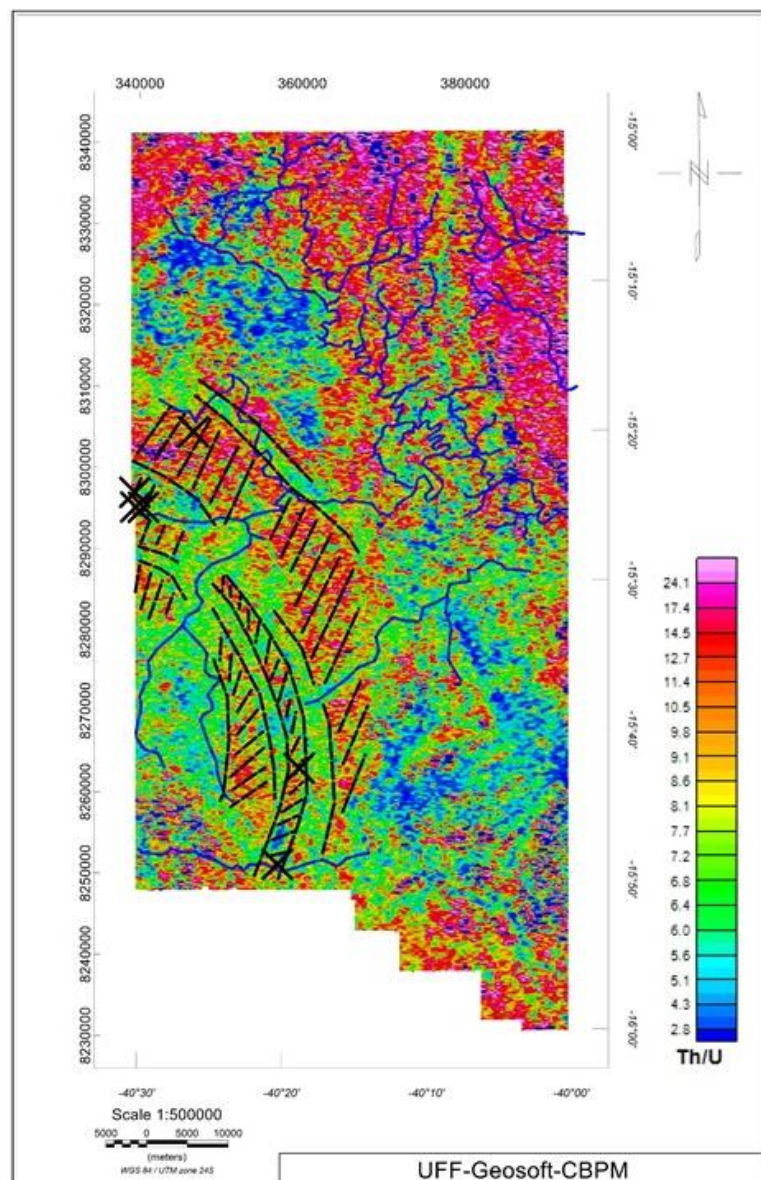


Figura 6.23: Ocorrências de grafita cadastradas localizadas nas regiões com maiores concentrações de tório, alinhadas em formas curvilíneas na região SW do mapa. Fonte: Autora.

Outra área que se mostrou interessante na região do mapa foi a feição

NW-SE definida como a camada da Unidade Campinarana-Inhobim, que possui litologia muito parecida com a da unidade presente na área de interesse deste trabalho, mas mostra uma concentração de urânio bem acentuada e também uma zona de alta magnetização, mostrando um padrão de respostas geofísicas totalmente inverso. A área não se apresentou como um possível alvo, mas chamou a atenção devido às características magnéticas, embora não há presença significativa de minerais magnéticos descritos no mapa geológico (fig. 2.3-a). Portanto, a interpretação de que nesta feição pode haver alguma falha associada com percolação de material magnético poderia ser melhor investigada em estudos futuros.

VII. CONCLUSÕES

Na região da cidade de Macarani, foi observado potencial para a exploração do minério grafita. Sendo assim, foi proposto para este trabalho a realização de parte do fluxo exploratório, envolvendo a etapa de reconhecimento aerogeofísico e posterior integração destes dados com os de sensoriamento remoto e de geologia regional, que propiciaram uma correlação de dados de origens diversas.

Do ponto de vista exploratório, em caráter regional, foi possível concluir que as melhores áreas da região de Macarani para a ocorrência de grafita são aquelas onde ocorrem baixa intensidade magnética, altos valores de urânio e tório, tendo uma maior razão tório/urânio, e relevos mais elevados. Estas condições estão presentes na Formação Ribeirão da Folha onde ocorrem grafita-cianita xistos e gnaisses e xistos grafitosos, nos quais já foram identificadas ocorrências de grafita.

Recomenda-se, desta forma, utilizar estas feições exploratórias em outras áreas deste domínio metamórfico, a fim de identificar possíveis novas áreas para posteriores levantamentos de *follow up* geofísico, com métodos elétricos e gravimétricos terrestres, por exemplo, já que a grafita é um mineral de grande capacidade para condução elétrica e também de baixa densidade, o que geraria bons contrastes. Estes alvos, caso identificados, poderão ser seguidos por um detalhamento geológico e geoquímico, através de trincheiras e furos de sondagem para dimensionamento de depósito, avaliações geoquímicas mais precisas e maiores informações que contribuam para a avaliação econômica e viabilidade de exploração da área.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Aisengart, T., Latinoamérica, G., Ando, J. L., Batista, L., & Ferreira, L. C. (2019). Automatic classification of density and magnetic domains from the Carajás mineral province.

Almeida, F. F. M. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349-364, dez. 1977.

Araújo, P. A. (2018). Inversão 2D de Dados Magnéticos e Modelagem Gravimétrica para Caracterização do Embasamento Adjacente à Bacia Sergipe-Alagoas. CPGG – UFBA.

Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H. (2018). Parameter estimation and inverse problems. Elsevier.

Brant, J. C. (2011). Transporte elétrico em nanoestruturas de grafeno: influência da funcionalização, da geometria e da dopagem do substrato. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Física.

Brito, H., Piumbini, B. S., da Luz, J. A. M., & Nascimento, E. M. D. (2018). Caracterização e prospecção de grafita do Complexo Jequitinhonha. *Geologia USP. Série Científica*, 18(1), 67-84.

Carvalho, L. M. M. (2006). Integração de dados de geofísica aérea aplicada à geologia e à prospecção mineral no Distrito Esmeraldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG.

Chaudhary, V., Bhatia, R. S., & Ahlawat, A. K. (2014). A novel Self-Organizing Map (SOM) learning algorithm with nearest and farthest neurons. *Alexandria Engineering Journal*, 53(4), 827-831.

Cordani, R., & Shukowsky, W. (2009). Magnetização remanescente: um parâmetro crucial para a interpretação e modelamento de anomalias magnéticas em território brasileiro. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(4), 659-667.

Daconti B.C. 2004. Contexto geológico, controle e correlação regional das mineralizações de grafita da região de almenara, Província grafítica do nordeste

de Minas Geras. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 95p.

de Carvalho, C.T., Lobato, L.M., Pedrosa-Soares, A.C. (1992). O corpo ultramáfico do Ribeirão da Folha, MG: aspectos petrográficos e geoquímicos da alteração hidrotermal. *Revista Escola de Minas*, 45 (1/2): 170-172.

de Jesus, K. A., Freire, E., & Guimarães, M. J. O. (2012). Grafeno: aplicações e tendências tecnológicas.

Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Duarte, M. A. (2008). *Grafita Natural*. DNPM/MG.

Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. *ASEG Extended Abstracts*, 2012(1), 1-4.

Faria, L. D. (1997). *Controle e tipologia de mineralizações de grafita flake do nordeste de Minas Gerais e sul da Bahia: uma abordagem regional* (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 112p).

Figueiredo, J. B. (2006). *Caracterização mineralógica, física e termobarométrica de minérios de grafita da província gráfitica Bahia-Minas*. UFMG.

Flores, D. Carvão, petróleo, gás natural e grafite: casos felizes de acumulação, preservação e evolução térmica da matéria orgânica. *Curso Foco "Geologia e Sustentabilidade"*. Porto, julho 2014., 25.

Gunn, P. J. (1998). Interpretation of airborne magnetic and radiometric surveys. *Course*, AGSO.

Harben, P. W., & Bates, R. L. (1990). *Industrial minerals: geology and world deposits*. Metal Bulletin.

Isles, D. J., & Rankin, L. R. (2013). Geological interpretation of aeromagnetic data. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists.

- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2009). Geofísica de exploração. Oficina de Textos.
- Klaja, J., & Dudek, L. (2016). Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes. *Nafta-Gaz*, 72(1), 3-14.
- Krauss, U. H., Schmidt, H. W., Taylor, H. A., Jr., and Sutphin, D. M. (1988). International Strategic Minerals Inventory summary report—Natural graphite: U.S. Geological Survey Circular 930–H, 29 p.
- Kuzvart M. (Ed.) (1984). Industrial minerals and rocks. Elsevier, Amsterdã, 454 pp.
- Lobato, E. (2009). Relatório Técnico 41: Perfil da Grafita.
- MacLeod, I. N., Vieira, S., & Chaves, A. C. (1993, November). Analytic signal and reduction-to-the-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. In *3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.
- McEnroe, S. A., Fabian, K., Robinson, P., Gaina, C., & Brown, L. L. (2009). Crustal magnetism, lamellar magnetism and rocks that remember. *Elements*, 5(4), 241-246.
- Moxham, R. M. (1963). Natural radioactivity in Washington county, Maryland. *Geophysics*, 28(2), 262-272.
- Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3), 507-517.
- Pastukhov, A. A., & Prokofiev, A. A. (2016). Kohonen self-organizing map application to representative sample formation in the training of the multilayer perceptron. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2(2), 134-143.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C.M., Vidal, Ph., Monteiro, R. L. B. P., Leonardos, O.H. (1992). Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil)-West Congolian (SW Africa) Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 6: 33-47.

Pedrosa-Soares, A.C. (1995). Potencial aurífero do Vale do Araçuaí, Minas Gerais: história da exploração, geologia e controle tectono-metamórfico. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 177 p.

Pedrosa-Soares, A. C., Vidal, Ph., Leonardos, O. H., Brito-Neves, B. B. (1998). Neoproterozoic oceanic remnants in eastern Brazil: further evidence and refutation of an exclusively ensialic evolution for the Araçuaí-West Congo Orogen. *Geology*, 26: 519-522.

Pedrosa-Soares A.C., Faria L.F., Reis L.B. (1999). The Minas-Bahia Graphite Province, eastern Brazil: mineralization controls and types. In: European Union Geosciences, Strasbourg. Abstract H04: 4A/09: F5, p. 493.

Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Wiedemann, C. M., & Pinto, C. P. (2001). The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian research*, 110(1-4), 307-323.

Pedrosa-Soares, A. C., Castañeda, C., QUEIROGA, C., Gradim, C., Belém, J., Roncato, J., ... & Jacobsohn, T. (2006). Magmatismo e tectônica do Orógeno Araçuaí no extremo Leste de Minas e Norte do Espírito Santo (18-19 S, 41-40 30'W). *GENOMOS-Instituto de Geociências da UFMG–Universidade Federal de Minas Gerais-Belo Horizonte-MG*.

Pedrosa-Soares, A.C., Queiroga, G.N., Gradim, C.T., Roncato, J.G., Novo, T.A., Jacobsohn, T., Lima, K.S. (2006). Geologia da Folha Mantena, 1:100.000. Programa Geologia do Brasil, UFMG-CPRM, 45 p.

Pereira, J. G., Ando, J. L., Barbosa, R. D., Aisengart, T., Pardal, M., & Rech, M. (2015, August). Inversão do vetor de magnetização, com e sem o uso de vínculo geológico, nas regiões de Araxá e Tapira, Minas Gerais–Brasil. In *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015* (pp. 294-299). Brazilian Geophysical Society.

Pires, A. C. B., & Harthill, N. (1989). Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. *Geophysics*, 54(10), 1326-1332.

Queiroga, G., Pedrosa-Soares, A. C., Quéméneur, J., & Castañeda, C. (2006). A Unidade Metasedimentar Do Ofiolito De Ribeirão Da Folha, Orógeno Araçuaí, Minas Gerais: Petrografia, Geotermobarometria E Calcografia. *Revista Geonomos*, 14(1).

Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation* (Vol. 155). Geosoft.

Reis L.B. (1999). Estudos de mineralizações de grafita no extremo nordeste de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 87p.

Ribeiro, T. S. (2017). Caracterização Geológica das Rochas Calcissilicáticas e Metacarbonáticas do Complexo Tanque Novo–Ipirá na Folha Pintadas–Ba: Potencial Metalogenético para Fosfato.

Robinson, E. S. (1988). *Basic Exploration Geophysics*.

Robinson Jr, G. R., Hammarstrom, J. M., & Olson, D. W. (2017). *Graphite* (No. 1802-J). US Geological Survey.

Stark, P. A., & de Carvalho, J. P. (1979). *Introdução aos métodos numéricos*. Interciência.

Suita, M.T.F., Pedrosa-Soares, A.C., Leite, C. A.S., Nilson, A. A., Prichard, H.M. (2004). Complexos ofiolíticos do Brasil e a metalogenia comparada das faixas Araçuaí e Brasília. In: E. Pereira, R. Castroviejo, F. Ortiz (eds). *Complejos Ofiolíticos en Iberoamérica: guías de prospección para metales preciosos*. Madrid, 101-132.

Scarton, L. (2017). Desenvolvimento, simulação matemática e caracterização de dispositivos sensores piezoresistivos de grafite.

Segundo, J. E. D. V., & Vilar, E. O. (2016). Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 11(2).

TISSOT, B.; WELTE, D. (2012). *Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration*. [S.l.]: Springer Science Business Media. Thurston, J. B., & Smith, R. S. (1997). Automatic conversion of magnetic

data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. *Geophysics*, 62(3), 807-813.

Vieira, A. T., Melo, F., Lopes, H. B. V., Campos, J. C V., Bomfim, L. F. C., Couto, P. A., Bevenuti, S. M. P. (2005). Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: estado – Bahia. Diagnóstico do município de Ipirá. CPRM.

Vieira, A. T., Melo, F., Lopes, H. B. V., Campos, J. C V., Bomfim, L. F. C., Couto, P. A., Bevenuti, S. M. P. (2005). Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: estado – Bahia. Diagnóstico do município de Pintadas. CPRM.