



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

LUANA CUNHA FERREIRA

**PROCESSAMENTO, INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
AEROMAGNETOMETRIA E AEROGAMAESPECTROMETRIA DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO**

Niterói, RJ
2018

LUANA CUNHA FERREIRA

**PROCESSAMENTO, INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
AEROMAGNETOMETRIA E AEROGAMAESPECTROMETRIA DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO**

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: Cleverson Guizan Silva

Coorientadoras: Telma Aisengart e Adalene Moreira Silva

Niterói
2018

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

F383p Ferreira, Luana Cunha
Processamento, Integração e Interpretação de Dados de
Aeromagnetometria e Aerogamaespectrometria do Estado do Rio de
Janeiro / Luana Cunha Ferreira ; Cleverson Silva, orientador ;
Telma Aisengart, coorientador. Niterói, 2018.
109 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica)-
Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências,
Niterói, 2018.

1. Geofísica. 2. Geologia. 3. MVI. 4. Magnetometria. 5.
Produção intelectual. I. Silva, Cleverson, orientador. II.
Aisengart, Telma, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

LUANA CUNHA FERREIRA

**PROCESSAMENTO, INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS DE
AEROMAGNETOMETRIA E AEROGAMAESPECTROMETRIA DO ESTADO DO
RIO DE JANEIRO**

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 14 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cleverson Guizan Silva
Universidade Federal Fluminense

Prof. André Luiz Ferrari
Universidade Federal Fluminense

Telma Aisengart
Geosoft Latinoamérica Ltda

Niterói
2018

*Aos meus pais:
Ronaldo da Silva Ferreira e Emiliane Cunha Ferreira*

Agradecimentos

Agradeço à toda minha família por todo suporte, em especial aos meus pais Emiliane Cunha Ferreira e Ronaldo da Silva Ferreira, que sempre lutaram para que eu tivesse a melhor educação. Agradeço ao meu amor, grande amigo e companheiro de carreira e vida Gabriel Lamounier por me incentivar e colaborar com a minha graduação e também para a elaboração desse trabalho.

Agradeço aos professores Cleverson Guizan, Adalene Moreira, André Ferrari e Natasha Stanton por me incentivarem e por todas as colaborações, levarei para todo sempre os ensinamentos que vocês me transmitiram. Agradeço à CPRM por disponibilizar dados e ao Governo Federal (2004 - 2016) por fomentar a aquisição de dados geofísicos e a pesquisa no país.

Sou muito grata à Geosoft por topar participar desse trabalho e por me proporcionar tantos aprendizados, amei cada instante do meu estágio e levo em coração a Telma Aisengart, J. Aldo, Monia, Diego Barbosa, Jana, Nathalia, Lucas, Aline e Norberto, muito obrigada por tudo.

Aos meus colegas de faculdade obrigada por tornarem meus dias melhores desde de 2014, em especial Lara Moreira Gadioli, Caetano Ayres, Thais Candido, Thábata, Moreno (Leandro Batista, obrigada por tudo), Matheus Mello, Mari Lopes, Clara Porto, Rayan Barbosa, Sophia Laranja, Pedrinho, Cintia, Ana Luiza Muniz (vou sentir muita saudade dos seus docinhos de leite ninho com Nutella), Lorena Gonçalves, Raquel Macedo, Gabriel Rocha, Arthur Lima, Ilson Filho, Thais Oliveira, Laísa Aguiar, Tone (Eberton Rodrigues, sim, precisei chegar no segundo período da faculdade para descobrir que o Tone se chama Eberton...) Amanda Bourguignon, João Anjos, Elo, Débora, Carol Ferreira, Alice e tantos outros. Estou aguardando os próximos churrascos da geofísica, o famoso ChurrasTone (ou será churraSTONE?).

Aos meus amigos queridos de vida Barbara Drude, Jéssica Azevedo, Bruna Neto, Aline Moreira, Kamilla Campos e a Duda Rodrigues.

Aos meus amigos do Laboratório LaC e LARAMAM em especial Carla Carvalho e Kita, que me ensinaram a dar meus primeiros passos na ciência.

Sou muito grata ao departamento de geofísica e de geologia da UFF, foram longos 10 períodos de muita aprendizagem e felicidade.

“Hoje me sinto mais forte mais feliz, quem sabe só levo a certeza de que muito pouco sei ou nada sei...”

Tocando em frente, Almir Sater e Renato Teixeira

Resumo

Este trabalho aborda a elaboração do conjunto de dados de geofísica restrito ao estado do Rio de Janeiro, mapas temáticos geofísicos e a modelagem da susceptibilidade magnética efetiva da área de estudo e, além disso, apresenta a interpretação dos resultados e suas respectivas correlações com as evidências geológicas descritas no Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Todos os dados abordados são públicos e estão disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil. A integração de dados geofísicos foi efetuada a partir da compilação de projetos aerogeofísicos, no qual trabalhou-se com os dados magnetométricos e gamaespectrométricos previamente corrigidos e associados aos contrastes físicos das unidades litológicas. O trabalho descreve de maneira simples e detalhada as etapas envolvidas para elaboração dos mapas temáticos geofísicos. A partir do processamento efetuado sobre os dados de magnetometria e gamaespectrometria foram gerados *grids* que são exibidos pelo presente estudo sobre a forma de mapas temáticos da área de estudo. Foram gerados os mapas do campo magnético anômalo, da derivada vertical, da amplitude do sinal analítico, da redução ao pólo, da inclinação do sinal analítico, a diferença da continuação ascendente, concentração de Potássio, concentração de Tório, concentração de Urânio, a composição ternária gamaespectrométrica e o mapa litoestrutural geofísico. Os métodos geofísicos abordados são complementares e abrangem fontes de superfície e subsuperfície. Através dos mapas de magnetometria foram definidos domínios magnéticos e foram observadas anomalias que não são evidenciadas em superfície. O método gamaespectrométrico, por outro lado, apresenta contrastes físicos de superfície e se relaciona diretamente com o mapa geológico. As interpretações geofísicas foram extraídas previamente sem suporte de evidências geológicas e, posteriormente foram correlacionadas com o Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. As interpretações geofísicas revelam um arcabouço estrutural complexo na área de estudo e ocorrências de intrusões alcalinas e graníticas.

PALAVRAS CHAVES: Magnetometria, Gamaespectrometria, MVI, Rio de Janeiro, Integração.

ABSTRACT

This work presents the elaboration of the geophysical data set restricted to the state of Rio de Janeiro, geophysical thematic maps and the modeling of the effective magnetic susceptibility of the study area and, in addition, presents the interpretation of the results and their respective correlations with the evidences described in the Geological Map of the State of Rio de Janeiro. All data are publicly available and are available from the Serviço Geológico do Brasil. The integration of geophysical data was done from the compilation of aerogeophysical projects and we worked with the previously corrected magnetometric and gammaspectrometric data and associated with the physical contrasts of the lithological units. The paper describes in a simple and detailed way the steps involved in the elaboration of the geophysical thematic maps. From the processing carried out on the data of magnetometry and gamma spectrometry grids were generated that are exhibited by the present study on the form of thematic maps of the study area. In this way the maps of the anomalous magnetic field, the vertical derivative, the amplitude of the analytical signal, the reduction to the pole, the slope of the analytical signal, the difference of the ascending continuation, the Potassium concentration, the Thorium concentration, the Uranium concentration, the gammaspectrometric composition and the geophysical lithostructural map. The geophysical methods covered are complementary and cover surface and subsurface sources. Magnetic domains were defined by magnetometry maps and anomalies were observed that are not evident on the surface. The gamma-spectrometric method, on the other hand, presents surface physical contractions and is directly related to the geological map. The geophysical interpretations were elaborated without support of geological evidences and, later, they were correlated with the Geological Map of the State of Rio de Janeiro. The geophysical interpretations reveal a complex structural framework in the study area and occurrence of alkaline and granitic intrusions.

KEYWORDS: Magnetometry, Gammaspectrometry, MVI, Rio de Janeiro, Integration.

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	2
1. APRESENTAÇÃO	2
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 ÁREA DE ESTUDO	4
II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
2. APRESENTAÇÃO	4
2.1 CONTEXTO DA PROVÍNCIA MANTIQUEIRA	4
2.2 CONTEXTO DA FAIXA RIBEIRA	5
III. MATERIAIS	7
3. APRESENTAÇÃO	7
3.1 MAPA GEOLÓGICO E DE RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	7
3.2 PROJETOS AEROGEOFÍSICOS	7
3.2.1 Dados do Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro – Projeto 1117	8
3.2.2 Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende – Projeto 1105	10
3.2.3. Dados do Projeto Aerogeofísico Espírito Santo – Projeto 1093	11
3.4 SOFTWARE	16
IV. MÉTODOS	16
4. APRESENTAÇÃO	17
4.1 CONVERSÃO DA PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA DOS DADOS DE AEROGEOFÍSICA	18
4.2 ANÁLISE DOS DADOS DE AEROGEOFÍSICA	18
4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS DE MAGNETOMETRIA	23
4.2.1 Preparação do Banco de Dados de Magnetometria	24
4.2.2 Interpolação dos Dados de Magnetometria	25
4.2.3 Micronivelamento	26

4.2.4 Primeira Derivada Vertical.....	28
4.2.5 Amplitude do Sinal Analítico.....	29
4.2.6 Redução ao Pólo.....	30
4.2.7 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou Tilt Derivative.....	31
4.2.8 Diferença da Continuação Ascendente.....	32
4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS DE GAMAESPECTROMETRIA.....	33
4.3.1 Preparação dos Dados de Gamaespectrometria.....	35
4.3.2 Interpolação e Produtos de Gamaespectrometria	36
4.3.3 Procedimento de Integração de Dados de Gamaespectrometria	36
4.3.4 Imagens Ternárias do Estado do Rio de Janeiro	37
4.4 INVERSÃO DOS DADOS DE MAGNETOMETRIA.....	37
4.4.1 Inversão do Vetor de Magnetização (MVI)	37
V. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5. APRESENTAÇÃO	41
5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS DADOS MAGNETOMETRIA.....	41
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS ..	60
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO MVI	73
5.4 CORRELAÇÕES GEOFÍSICAS-GEOLÓGICAS	76
VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6. CONCLUSÕES.....	84
6.1 SUGESTÕES	87
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
VII. ANEXOS	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do levantamento de dados do Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117), Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e do Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093)	15
--	----

LISTA DE ABREVIACÕES

ASA	Amplitude do Sinal Analítico
B.D.	Banco de Dados
CMA	Campo Magnético Anômalo Reduzido do
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
Cps	Contagens por segundo
DZ	Primeira Derivada Vertical
Gama.	Gamaespectrometria
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
Km	Quilômetros
m	Metros
Mag.	Magnetometria
MVI	Magnetization Vector Inversion
nT	NanoTesla
N	Norte
NE	Nordeste
NW	Noroeste
ppm	Partes por milhões
RBG	Padrão vermelho (<i>red</i>), azul (<i>blue</i>) e verde (<i>green</i>)
RJ	Estado do Rio de Janeiro
RTP	Redução ao Pólo
s	segundo
S	Sul
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Estado do Rio de Janeiro com dados de SRTM.	4
Figura 2: Distribuição das províncias estruturais brasileiras. (Extraído de Almeida et al.,1981)	5
Figura 3: Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil. (Heilbron et al.,2016)	6
Figura 4: Localização da área sobrevoada pelo Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (1117)..	9
Figura 5: Localização da área sobrevoada pelo Projeto Aerogeofísico São José dos Campos - Resende (1105).	10
Figura 6: Localização da área Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (1093).	12
Figura 7: Fluxograma simplificado da metodologia abordada.	17
Figura 8: Fluxograma detalhando os itens 4.1 e 4.2.	19
Figura 9: Mapa de distribuição de dados dos projetos aerogeofísicos Rio de Janeiro (Projeto 1117), São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Espírito Santo (Projeto 1093).	21
Figura 10: Em detalhe, áreas não sobrevoadas pelos projetos aerogeofísicos. a) Área não amostrada pelo projeto 1105. b) Região não amostrada sobre a Baía de Guanabara. c) Região não amostrada pelo projeto 1117. d) Área não levantada pelo projeto 1093.	22
Figura 11: Imagem das linhas de voo em detalhe as áreas comuns aos projetos. I) Área limite entres os projetos Rio de Janeiro (linhas laranja) e São José dos Campos-Resende (linhas azuis). II) Área limite entres os projetos Rio de Janeiro (linhas laranjas) e Espírito Santo (Linhas Verdes).	23
Figura 12: Fluxo de trabalho aplicado aos dados magnetométricos.	24
Figura 13: Ambas da mesma área, região tangente entre os projetos 1117 e 1093. I) A imagem do campo anômalo antes do procedimento do micronivelamento. II) Resultado obtido após o micronivelamento.	28
Figura 14: Comparação entre perfis do canal do CMA na porção superior da imagem e o canal gerado após a filtragem pela ASA. Os quadrados evidenciam as anomalias magnéticas.	30
Figura 15: Comparação entre o grid do CMA (a) e o grid gerado pela ASA (b).	30
Figura 16: Fluxograma esquemático do processamento de dados gamaespectrométricos.	34
Figura 17: Descrição das projeções associadas ao vetor de magnetização.	40
Figura 18: Fluxo de trabalho da inversão do vetor de magnetização.	40
Figura 19 : Mapa do Campo Magnético Anômalo no estado do Rio de Janeiro.	42
Figura 20: Interpretação dos domínios magnéticos no Estado do Rio de Janeiro a partir do Mapa do Campo Magnético Anômalo.	43

Figura 21: Perfis do CMA dos domínios magnéticos.	44
Figura 22: Perfil do Campo Magnético Anômalo entre domínios magnéticos.....	45
Figura 23: Mapa da Primeira Derivada Vertical no estado do Rio de Janeiro.	48
Figura 24: Mapa da Primeira Derivada Vertical interpretado.....	49
Figura 25: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico no estado do Rio de Janeiro.	51
Figura 26: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico interpretado.	52
Figura 27: Mapa da Redução ao Pólo no estado do Rio de Janeiro.	53
Figura 28: Mapa da Redução ao Pólo interpretado com as principais características ressaltadas.	54
Figura 29: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico no estado do Rio de Janeiro.....	56
Figura 30: Mapa da inclinação do sinal analítico com as principais características ressaltadas.	57
Figura 31: Mapa da Diferença da Continuação Ascendente no estado do Rio de Janeiro.....	58
Figura 32: Mapa da diferença da Continuação Ascendente interpretado.....	59
Figura 33: Mapa do Potássio Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.	61
Figura 34: Mapa do Potássio anômalo interpretado e restrito ao estado do Rio de Janeiro....	62
Figura 35: Mapa Tório Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.	63
Figura 36: Mapa do Tório Anômalo interpretado e restrito ao estado do Rio de Janeiro.	64
Figura 37: Mapa do Urânio Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.	65
Figura 38: Mapa da concentração de Urânio Anômalo e restrito ao estado do Rio de Janeiro.	66
Figura 39: Mapa da Composição Ternária dos Radioisótopos no Estado do Rio de Janeiro.	67
Figura 40: Mapa da Composição Ternária de Tório, Urânio e Potássio com a identificação de domínios gamaespectrométricos. Polígonos hachurados em branco destacam áreas danificadas.	69
Figura 41: a) Região entre os limites dos Domínios Gamaespectrométricos I e IV exibindo centro da fonte e as feições lineares bordejando a anomalias. b) Anomalia regional de coloração branca originando lineamentos de mesmo tom.	70
Figura 42: Em detalhe a região ao norte do RJ, o Domínio Gamaespectrométrico II alimentado por sedimentos provenientes das anomalias regionais (polígonos hachurados) do domínio IV e V. As feições lineares (linhas pretas) se assemelham à um sistema fluvial.	71
Figura 43: Mapa Litoestrutural Geofísico do Estado do Rio de Janeiro.	72
Figura 44: Resultado obtido pela Inversão do Vetor de Magnetização.....	73
Figura 45: Em detalhe, a modelagem da susceptibilidade efetiva obtida pelo MVI.....	74

Figura 46: Modelo da amplitude da susceptibilidade efetiva obtida pelo MVI.	74
Figura 47: a) Localização da anomalia magnética na região central do RJ. A anomalia em detalhe pelo CMA (b), ASA(c), RTP (d) e pelo modelo da amplitude visto de cima (e) e em 3D (f).	76
Figura 48: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico sobreposto ao Mapa Geológico com transparência de 50%.	83

I. INTRODUÇÃO

1. APRESENTAÇÃO

O presente estudo é um trabalho final de conclusão de curso de graduação em geofísica, no qual dados públicos de levantamentos aéreos de magnetometria e gamaespectrometria foram processados e integrados às informações geológicas disponíveis na literatura científica sobre a área de estudo, no caso o estado do Rio de Janeiro (RJ). Além das etapas usuais do processamento de dados, a inversão do vetor de magnetização (MVI) também foi executada para obtenção do modelo de magnetização da região.

Os dados de geofísica utilizados para compor o presente trabalho são provenientes do Programa Geologia do Brasil e estão disponibilizados publicamente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Tendo em vista que não há um único conjunto de dados de geofísica correspondente a todo território do estado do Rio de Janeiro disponível publicamente, uma compilação de projetos aerogeofísicos foi a solução para se obter integralmente a geofísica da área de estudo. Desta maneira operou-se diretamente com os projetos Rio de Janeiro (Projeto 1117), São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Espírito Santo (Projeto 1093). Este trabalho final de conclusão de curso simplifica e exhibe todos os processos utilizados para unir os dados e gerar o conjunto de dados da geofísica correspondente à área de estudo e seus respectivos resultados sobre a forma de mapas temáticos geofísicos.

É importante ressaltar que apesar do Projeto Aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro (1038 e 1039) ser bastante empregado na literatura científica, ele não foi utilizado para o estudo por se tratar de um dado mais antigo e produto de uma aquisição de dados com menor resolução quando comparado aos projetos 1117, 1105 e o 1093. Esses três projetos utilizados para esse trabalho são mais atuais, possuem melhor resolução, um sistema de aquisição de dados mais preciso e características técnicas de aquisição semelhantes entre si.

O estudo em questão adotou o processamento de dois métodos geofísicos que se complementam: a magnetometria e a gamaespectrometria. Em relação às anomalias magnéticas pode-se afirmar que o método magnetométrico possui diversas aplicações tais como a caracterização geológica de uma região. É um método potencial, no qual a partir de medidas do campo magnético total de uma superfície terrestre é possível extrair o valor do campo magnético anômalo dessa região. Através de estudos sobre o comportamento do campo anômalo pode-se investigar as litologias de superfície e subsuperfície por meio do contraste da magnetização associada à cada tipo de rocha. Dessa forma, o método magnético apresenta-se

como uma ferramenta potencial para colaborar com maior entendimento da geologia da área de estudo. A maior parte dos minerais constituintes das rochas, entretanto, não apresentam propriedade magnéticas suficientes para contribuir para a magnetização da unidade litológica. Os minerais magnéticos são caracterizados por serem minerais acessórios de uma rocha, mas fatores relacionados aos seus percentuais de concentração podem produzir variações bruscas da magnetização associada à litologia. Diante disso, a investigação da variação do campo magnético anômalo está diretamente relacionada com a presença de minerais magnéticos tais como, por exemplo, a magnetita e óxidos de Ferro e Titânio. Os contrastes produzidos pelas concentrações desses minerais magnéticos colaboram para identificação e correlações com as unidades geológicas.

A gamaespectrometria, por outro lado, não é um método potencial, e está relacionada com a emissão de radiação gama por meio dos isótopos radioativos instáveis na natureza Tório (^{232}Th), Urânio (^{238}U) e Potássio (^{40}K). Sabe-se que a gamaespectrometria é um método probabilístico e superficial, no qual cerca de 90% do seu sinal é resultado da radiação derivada de materiais que se encontram em subsuperfície a uma distância menor que meio metro. Nesse sentido, apenas a rocha não intemperizada, rocha intemperizada e o material transportado são ditas como possíveis fontes da radiação gama natural que medimos na gamaespectrometria (Gunn *et al.*, 1997). Paralelamente, é importante frisar que através desse método também é possível diferenciar rochas em função das diferentes assinaturas radioativas, o que torna a gamaespectrometria um instrumento fundamental para o mapeamento geológico de uma região (Moxham, 1963; Pires & Harthill, 1989). Assim os produtos obtidos dos dados gamaespectrométricos ajudam o refinamento e caracterização de mapas anteriores e posteriores aos campos de mapeamento geológico.

Todos os dados utilizados ao longo do presente trabalho foram operados no *software* Oasis montaj da Geosoft, onde foram efetuadas todas as etapas do processamento de dados de magnetometria e gamaespectrometria e a inversão dos dados de magnetometria.

1.1 OBJETIVOS

Um dos objetivos traçados é elaborar o conjunto de dados geofísicos referentes aos métodos magnetométrico e gamaespectrométrico do estado do Rio de Janeiro, diante disso a integração entre projetos aerogeofísicos também é alvo do presente estudo. Outro objetivo abordado é realização de uma análise qualitativa das principais anomalias geofísicas regionais e sua integração à geologia da área. Esse trabalho visa contribuir com maiores informações dos contrastes físicos associados à distintas litologias que compõem o estado do

Rio de Janeiro. A geologia da Faixa Ribeira, no qual encontra-se inserido o RJ, ainda se preserva complexa e é alvo de contínuos estudos. Com o avanço da tecnologia, diversos instrumentos atualmente estão sendo utilizados para progredir nessa discussão. Esse trabalho oferece a geofísica como uma potencial ferramenta para investigações da geologia do RJ, tendo em vista que extrair informações geofísicas e correlacioná-las com a geologia pode colaborar e dialogar com estudos passados e contemporâneos.

Diante disso, a partir dos dados públicos disponíveis o estudo em questão descreve detalhadamente as etapas envolvidas para obtenção do conjunto de dados de geofísica do estado do Rio de Janeiro, apresenta os mapas temáticos geofísicos e a modelagem da susceptibilidade efetiva que contemplam a área de estudo e, além disso, correlaciona as observações extraídas dos produtos geofísicos com as evidências geológicas existentes.

1.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo definida é o estado do Rio de Janeiro. Localizado na região sudeste do Brasil na América do Sul. A figura 1 exhibe em detalhe a área de estudo com dados de altimetria *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

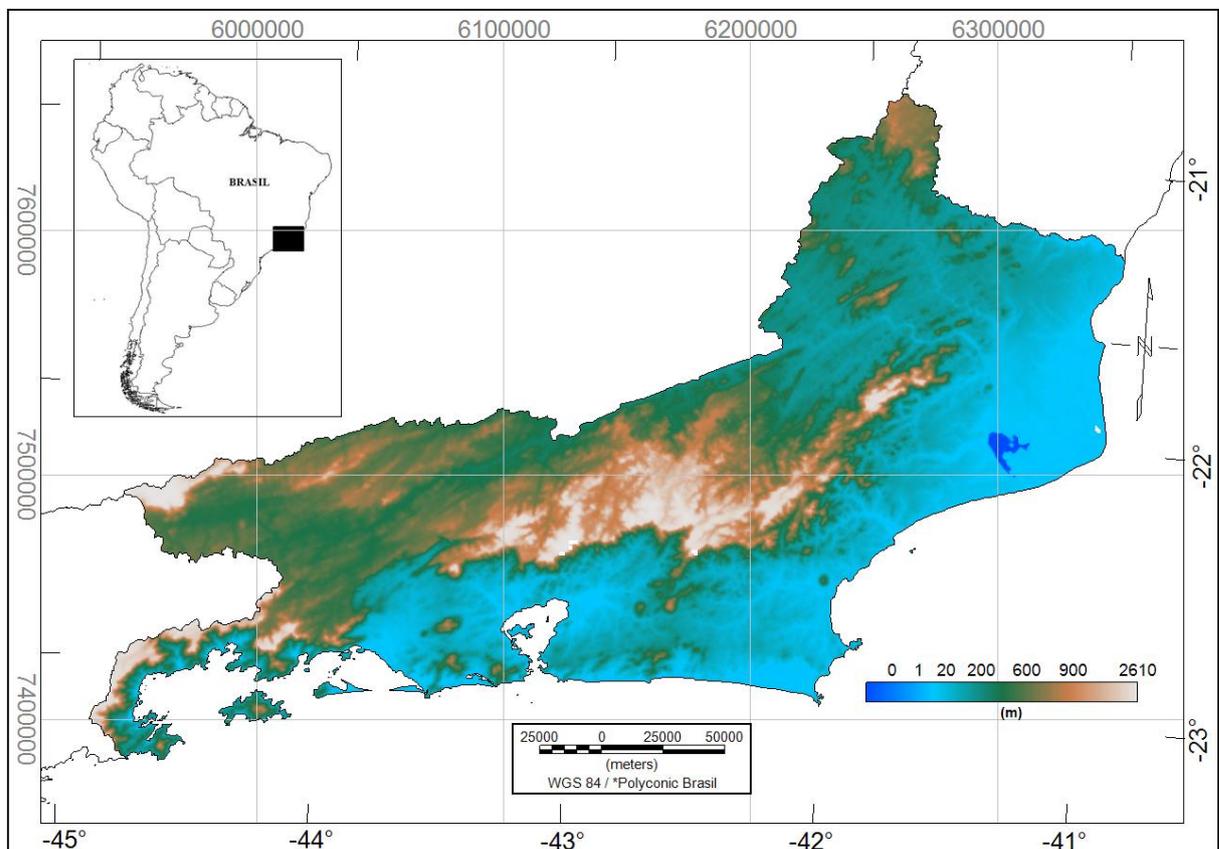


Figura 1: Localização do Estado do Rio de Janeiro com dados de SRTM.

II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2. APRESENTAÇÃO

O presente capítulo apresenta os principais aspectos da geologia regional no qual o estado do Rio de Janeiro está inserido. Essa revisão do contexto geológico é necessária para maior entendimento do comportamento do sinal geofísico e a integração da geofísica com a geologia da área de estudo.

Nesse sentido, é preciso ressaltar que entender a geologia do Rio de Janeiro implica em aprofundar nossos conhecimentos acerca da Faixa Ribeira Central, que por sua vez encontra-se contido na Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1981). Assim é necessário abordar o contexto da Província Mantiqueira seguida pela Faixa Ribeira e sua composição de terrenos tectônicos estruturais.

De uma maneira geral, a área de estudo apresenta uma geologia complexa marcada por um alto grau de metamorfismo relacionado às intensas atividades tectônicas que ocorreram nessa região no longo período conhecido como Orogênese Brasileira (Heilbron *et al.*, 2004; Schmitt *et al.* 2004;2008; Tupinambá *et al.*, 2002; Fernandes *et al.*, 2015).

2.1 CONTEXTO DA PROVÍNCIA MANTIQUEIRA

Desenvolvida no Ciclo Brasileiro, a Província Mantiqueira é definida como uma província estrutural localizada na porção sudeste da América do Sul, paralela ao litoral e estendendo-se do sul da Bahia até o Uruguai (Almeida *et al.*, 1981). A figura 2 ilustra a localização das províncias estruturais no Brasil, nessa figura é possível identificar o contexto da Província Mantiqueira.

Restrita pelas Províncias São Francisco, Tocantins e Paraná, a Província Mantiqueira contém diferentes orógenos como por exemplo, o Ribeira, Araçuaí, Dom Feliciano e São Gabriel e também é marcada pela zona de interferência entre as Faixas Brasília e Ribeira.

O contexto geológico da Província Mantiqueira é complexo e um dos mais completos que ocorreram no Pré-Cambriano, especificamente no período denominado Ciclo Brasileiro e tendo em vista que se trata de um sistema orogênico diacrônico e essencialmente acrescionário (Heilbron *et al.*,2004). Nesse sentido, os processos de colisões de massas continentais e as etapas de subducção poderiam ter ocorrido em porções espaciais distintas, porem temporais similares.

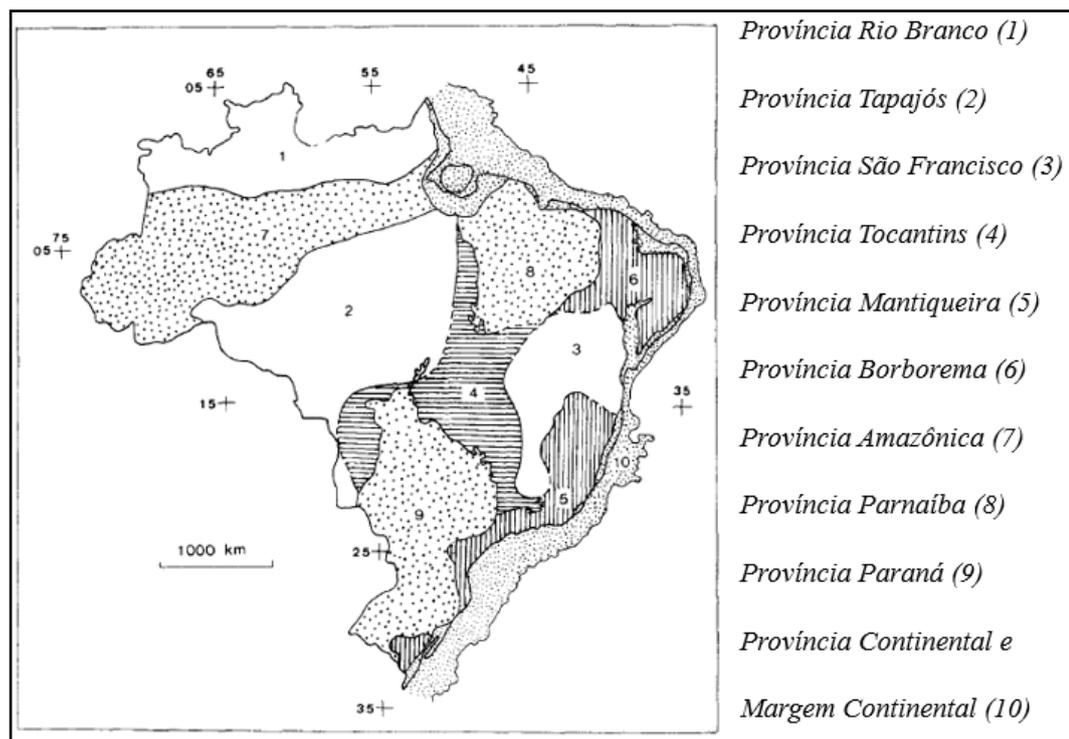


Figura 2: Distribuição das províncias estruturais brasileiras. (Extraído de Almeida et al.,1981)

2.2 CONTEXTO DA FAIXA RIBEIRA

A Faixa Ribeira apresenta cerca de 1400 km de extensão na direção NE-SW ao longo do litoral sudeste do Brasil e alterna para o *trend* NNE-SSW no extremo noroeste do estado do Rio de Janeiro dando início ao contexto da Faixa Araçuaí. Sobre a Faixa Ribeira é possível afirmar que ela é o resultado do Orógeno Ribeira, um importante cinturão marcado por sucessivos eventos de colisões durante a Orogenia Brasileira-Panafricana entre os períodos Neoproterozoico - Cambriano até Ordoviciano Inferior (Heilbron *et al.*, 2004, Schmitt *et al.*,2004).

A Faixa Ribeira atualmente é subdividida em quatro terrenos tectônicos: domínio Ocidental, Klippe Paraíba do Sul, domínio Oriental e Cabo Frio (Heilbron *et al.*, 2008). A figura 3 exibe o mapa tectônico simplificado da região sudeste do Brasil indicando a localização da Faixa Ribeira e dos terrenos Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio de oeste para leste, respectivamente.

O Terreno Ocidental é descrito por rochas que caracterizam o retrabalhamento do embasamento do Cráton do São Francisco com sucessões de margem passiva do Meso-Neoproterozoico e é marcado por uma intensa deformação cisalhante com intensas zonas de cisalhamento. Já o Terreno Paraíba do Sul, sobreposto ao Terreno Ocidental, é datado do

paleoproterozóico e apresenta rochas relacionadas à deformação dúctil, intrusões graníticas neo-proterozóicas além de incluir os domínios Embu, Paraíba do Sul e Cambuci.

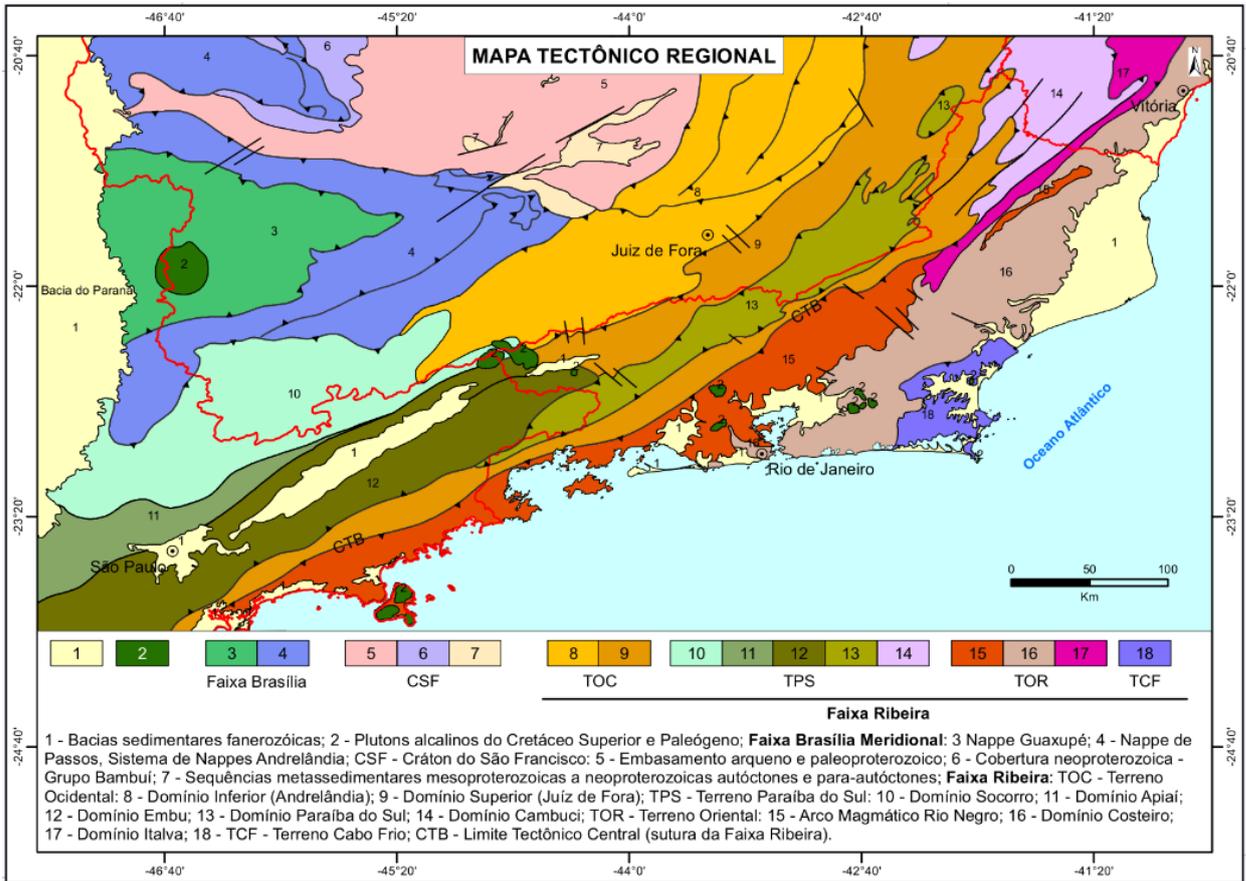


Figura 3: Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil. (Heilbron *et al.*, 2016)

O Terreno Oriental é caracterizado por um regime colisional com rochas de alto grau metamórfico, apresenta intrusões de rochas magmáticas compreendendo dois domínios: o Domínio Arco Magmático Rio Negro e Domínio Costeiro (Heilbron *et al.*, 2003; Tupinambá *et al.*, 2012). O Domínio Costeiro é definido por sequências de rochas metassedimentares como o caso do Grupo São Fidélis e por sequências de ortognaisses. Enquanto o Domínio Arco Magmático Rio Negro é caracterizado por rochas plutônicas e ortognaisses associadas ao arco magmático.

O Domínio Tectônico Cabo Frio (DTCF) apresenta embasamento paleoproterozóico associado à evolução do Bloco Angola (Craton Congo), retrabalhado no final do último estágio do Brasiliano, possui rochas metamórficas de alto grau de sequências Vulcano – sedimentar como, o caso da Sequência Búzios (Schmitt *et al.*, 2004;2008, Fernandes *et al.*, 2005).

III. MATERIAIS

3. APRESENTAÇÃO

Nesse capítulo os dados empregados para o desenvolvimento desse trabalho são apresentados e justificados. Tal estudo envolve o Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro 1:400.000 (Heilbron *et al.*,2016) e dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria de projetos aerogeofísicos no formato XYZ com todas as etapas de pré-processamento executadas, ambos fornecidos publicamente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Para compor integralmente o RJ foram abordados os projetos aerogeofísicos: Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117), Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093). Por isso, o presente capítulo descreve o panorama geral desses três levantamentos aerogeofísicos.

3.1 MAPA GEOLÓGICO E DE RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

O Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro na escala 1:400000 (anexo) foi utilizado para efetuar a integração entre os produtos gerados a partir do processamento de dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria e a geologia da área de estudo. Para isso, foi necessário trabalhar com os arquivos vetoriais associados às litologias e estruturas do Rio de Janeiro. O Mapa Geológico do Rio de Janeiro encontra-se disponível publicamente pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

3.2 PROJETOS AEROGEOFÍSICOS

Provenientes do Programa Geologia do Brasil, os projetos aerogeofísicos são essencialmente dados de levantamento de geofísica aérea de diversas regiões do Brasil e, atualmente, encontram-se disponíveis gratuitamente para toda sociedade através do Banco de Dados da CPRM (Portal GeoSBG). Dentro de cada projeto é possível encontrar três classes de produtos: relatório técnico, os principais resultados de geofísica correspondentes ao projeto em formato imagem e os dados da aquisição (arquivo XYZ).

O relatório técnico apresenta todas as especificações referentes às etapas de planejamento, aquisição, correção e o processamento de dados realizados pela empresa contratada. As imagens de geofísica são os resultados obtidos a partir do processamento completo dos dados de aerogeofísica. O arquivo XYZ contém o dado bruto adquirido durante

o aerolevantamento e o dado com todas correções posteriores à aquisição executadas como, por exemplo, correção do erro de paralaxe, correções de variações diurnas e entre outras correções, ou seja, o dado corrigido associado aos contrastes físicos de unidades litológicas. Nos próximos subitens além de todas as informações técnicas associadas à aquisição, essas correções que foram aplicadas aos dados de cada projeto aerogeofísico serão descritas.

3.2.1 Dados do Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro – Projeto 1117

Com linhas de voo e de controle espaçadas 0,5 Km e 10 Km e orientação N-S e E-W, respectivamente, o Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117) foi uma aquisição aérea de dados de magnetometria e gamaespectrometria regional de alta resolução. Concentrados em sua totalidade no estado do Rio de Janeiro, esses dados geofísicos foram adquiridos entre os anos de 2011 e 2012, e cobrem aproximadamente 32.202 Km² e 66.111,40 Km de perfis aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos. Cerca de 476 linhas de voo e 26 linhas de controle foram elaboradas ao longo desse projeto, entretanto determinadas linhas foram parcialmente executadas em função da presença de espaços aéreos condicionados proibidos e/ou restritos na área de aquisição. A figura 4 exhibe a área da prospecção.

Para esse levantamento de dados, o voo apresentou uma velocidade média de 270 Km/h e sua altura foi fixada em 100 m sobre o terreno assumindo-se variações de 15 m. Para a aquisição de dados de magnetometria foram feitas leituras a cada 0,1 s, ou seja, apresenta uma taxa de amostragem de 7,5 m, enquanto as leituras do gamaespectrômetro respeitam o tempo de 1 s e, conseqüentemente, uma taxa de amostragem próxima de 75 m. Além disso, para esse levantamento foram utilizados o gamaespectrômetro o RS-500 da *Radiations Solutions Inc* com 1024 canais e o aeromagnetômetro de bombeamento óptico da *Geometrics* modelo G822A. O sistema do magnetômetro consiste no sensor de vapor de césio acoplado a aeronave e, no geral, possui elevada precisão por conta das leituras do campo magnético serem praticamente instantâneas (Reeves, C.2005).

Na fase posterior à aquisição, todos os dados brutos de campo foram processados ao *software* Oasis montaj versão 6.4.1 (Geosoft) para elaboração dos bancos de dados em formato XYZ referentes às informações de magnetometria e gamaespectrometria. Nessa fase, todos os registros adquiridos em campo foram compilados em um único banco de dados e cada característica foi agrupada em forma de canais. A etapa seguinte corresponde às correções aplicadas aos dados geofísicos prospectados, essa etapa é fundamental para efetuar o processamento do dado anômalo. Essas correções são necessárias por conta das variações magnéticas e de radiação gama naturais associadas aos dados brutos. Para as informações de

magnetometria foram aplicadas as seguintes correções: correção do erro de paralaxe, remoção da variação magnética diurna, nivelamento e micronivelamento de perfis e remoção do campo geomagnético terrestre através do *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)* gerando o canal do campo magnético anômalo (CMA).

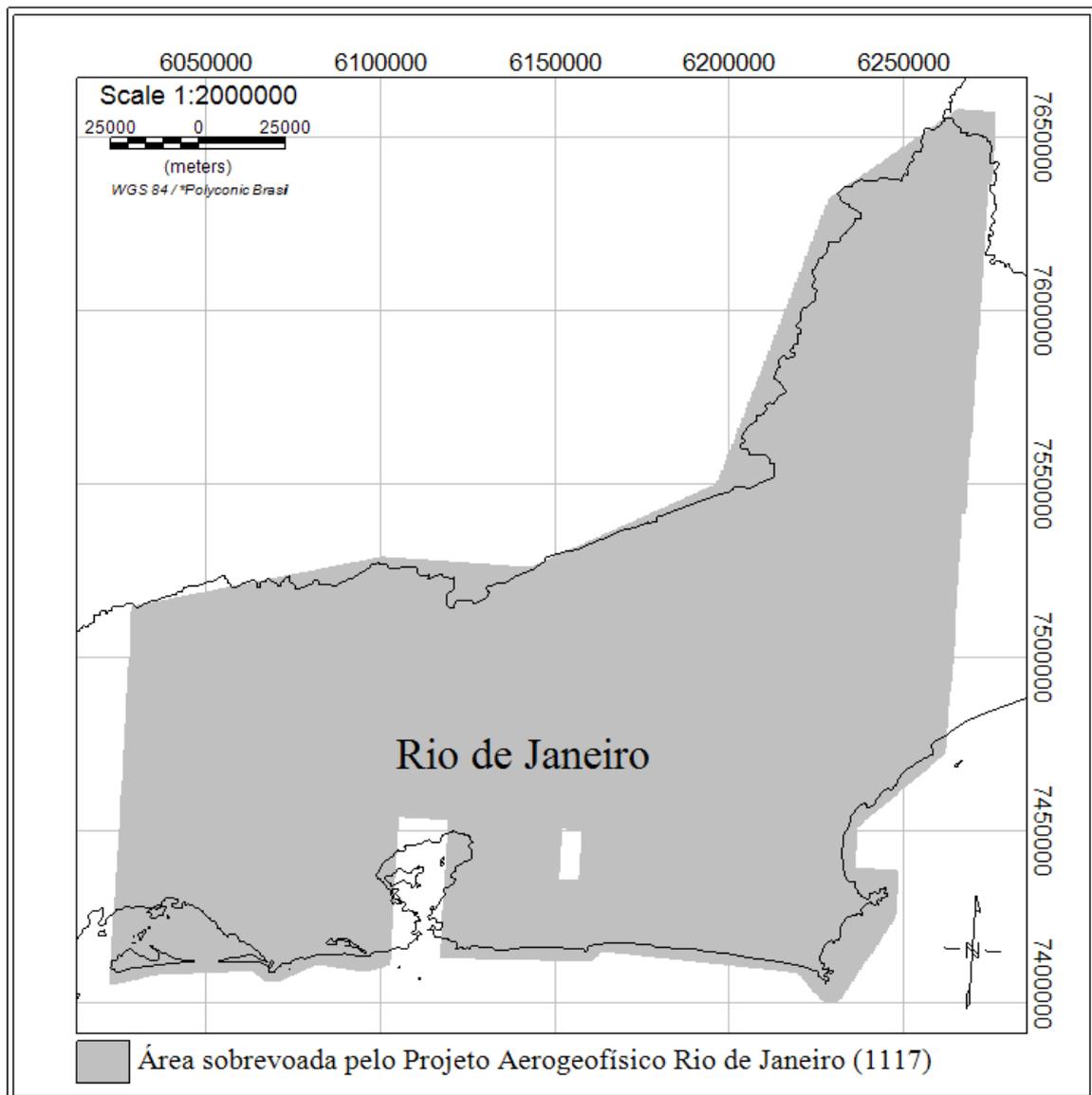


Figura 4:Localização da área sobrevoada pelo Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (1117).

Para os dados de gamaespectrometria o processamento de dados seguiu o padrão recomendado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) através do Relatório Técnico Número de Série 323 (IAEA,1991) como a correção do tempo morto, correção do erro de paralaxe, correção altimétrica, correção do efeito Compton e entre outros. Ao final desse processo, os bancos de dados gerados nos exibem tanto as informações adquiridas em campo como, também, os dados corrigidos.

3.2.2 Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende – Projeto 1105

O Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) compreende uma região total de 47.321 Km² entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, como mostra a figura 5. Realizado no período de 2010 a 2013 e com 101.085 Km de perfis lineares de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria distribuídos em 621 linhas de voo e 30 linhas de controle.

Para aquisição de dados desse projeto, a velocidade média do voo foi registrada em 265 Km/h, a altura de voo foi estabelecida em 100m sobre o terreno com variações de 15 m até 2 Km, e as linhas de voo estão orientadas N-S com espaçamento de 0,5 Km, enquanto as linhas de controle apresentam orientação E-W e espaçamento de 10 km.

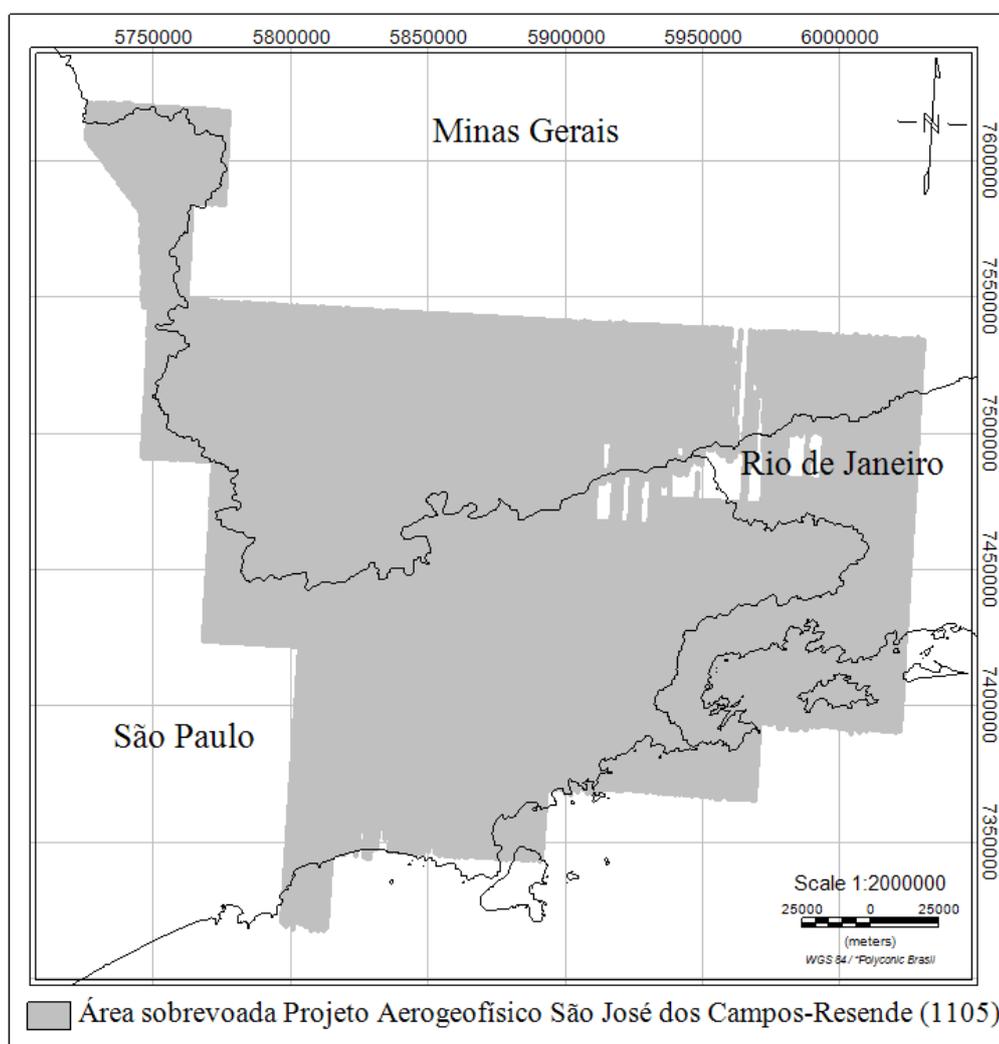


Figura 5:Localização da área sobrevoada pelo Projeto Aerogeofísico São José dos Campos - Resende (1105).

As leituras de magnetometria têm intervalos de medições de 0,1 s até 0,01 s, ou seja, há amostras que variam aproximadamente de 0,75 m até 7,5 m. Já para gamaespectrometria a taxa de amostragem é de 1,0 s representando uma leitura a cada 75 m de perfil, nesse sentido, pode se afirmar que o projeto 1105 apresenta uma densa taxa de amostragem da região. Nesse levantamento de dados foram utilizados os gamaespectrômetros *Pico Envirotec* modelo GRS410 com 512 canais espectrais, *Exploranium* GR820 (256 canais) e RS-500 da *Radiation Solutions* com 1024 canais e os magnetômetros de bombeamento óptico *Aeromaster* VN2001, *PicoEnvirotec* MMS4 e o KAMAG 4 da *KroumVS Instruments* de alta precisão. A tabela 1 apresenta as principais informações da aquisição dos dados do Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105).

Ao final da aquisição, os dados brutos de campo foram importados para o *software* Oasis montaj versão 5.1.8 (Geosoft) com o objetivo de gerar o banco de dados de cada método geofísico. Nessa etapa, o relatório técnico da CPRM descreve que as informações adquiridas em campo foram organizadas em canais e a correção dos dados foi iniciada. É descrito que os dados de magnetometria sofreram correções de compensação magnética, correção do erro de paralaxe, remoção das variações magnéticas diurna, remoção do IGRF, nivelamento de perfis e o micro-nivelamento de perfis. Por outro lado, o processamento de dados de gamaespectrometria foi submetido às recomendações técnicas da Agência Internacional de Energia Atômica envolvendo a correção do tempo morto, correção do erro de paralaxe, remoção do efeito *compton* e outros ((IAEA,1991). Dessa forma, foram obtidos bancos de dados com canais que contém informações de campo e dados geofísicos corrigidos.

3.2.3. Dados do Projeto Aerogeofísico Espírito Santo – Projeto 1093

Cobrindo integralmente o estado do Espírito Santo e partes de regiões adjacente, o Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093) apresenta uma densa resolução regional com linhas de voo N-S e espaçamento de 0,5 Km e linha de controle orientadas E-W e espaçamento de 10 Km. São cerca de 124.236 Km de perfis aereomagnetométricos e gamaespectrométricos distribuídos em 58.346 Km² e com 505 linhas de voo e 50 linhas de controle. A figura 6 descreve a área de aquisição do projeto 1093.

Durante a aquisição de dados, a altura do voo foi fixada em 100m sobre o terreno com variações de 15m, a velocidade aproximada do voo era de 270 Km/h e foram feitas leituras de magnetometria a cada 0,1 s com uma taxa de amostragem aproximada de 7,5 m, e de gamaespectrometria a cada 1 s respeitando uma amostragem de aproximadamente 75 m ao

longo dos perfis. A tabela 1 apresenta resumidamente as principais características técnicas da aquisição dos dados.

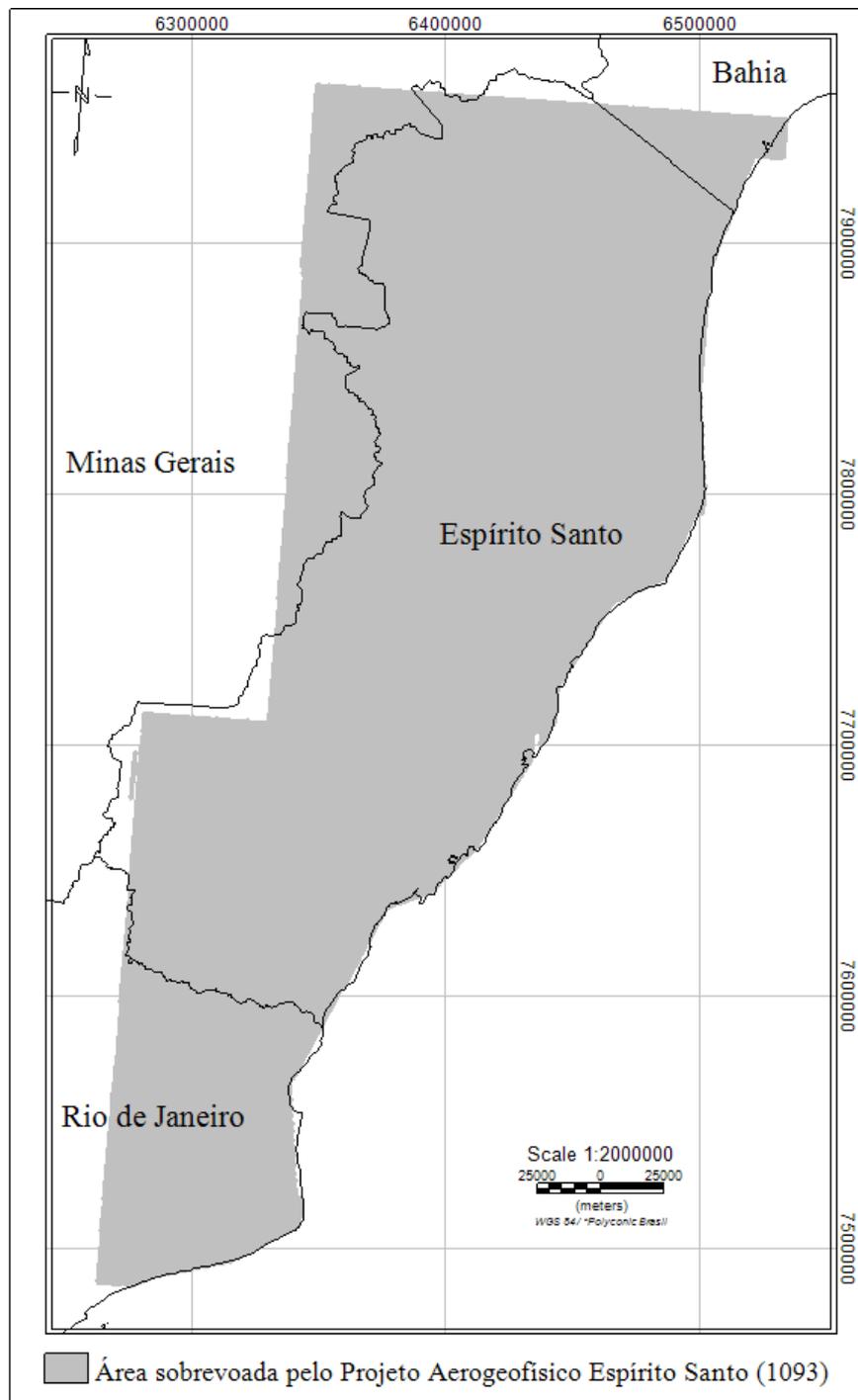


Figura 6:Localização da área Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (1093).

Após a aquisição, os dados foram importados no *software* Oasis montaj (Geosoft) versão 6.4.1 para elaboração do banco de dados, nessa etapa os dados foram compilados e organizados em canais de acordo com as características do levantamento. Feito isso e levando em consideração todas as variações naturais associadas às medições de campo, é necessário, no

primeiro momento, a aplicação de uma série de correções aos dados geofísicos afim de possibilitar a sua manipulação posteriormente. Nesse sentido, ambos os dados de magnetometria e gamaespectrometria sofreram os mesmos fluxos de correções descritos nos projetos anteriores. Os dados de magnetometria sofreram correções do erro de paralaxe, remoção das variações magnéticas diurna, remoção do IGRF, nivelamento de perfis e o micro-nivelamento de perfis. Já os dados de gamaespectrometria foram submetidos às recomendações técnicas da Agência Internacional de Energia Atômica envolvendo a correção do tempo morto, correção do erro de paralaxe, remoção do efeito *compton* e outros (IAEA,1991). A tabela 1 resume as principais características do projeto Espirito Santo.

		Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093)	Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117)	Projeto Aerogeofísico São José dos Campos - Resende (Projeto 1105)
Aquisição de dados	Ano de aquisição	2009 – 2010	2011 - 2012	2010 -2013
	Altura de voo	100 ± 15 m	100 ± 15 m	100 ± 15 m /100 ± 2000 m
	Velocidade de voo	± 270 Km/h	± 270 Km/h	± 265 Km/h
	Espaçamento entre linhas de voo	0.50 Km	0.5 Km	0.5 Km
	Orientação das linhas de voo	N-S	N-S	N-S
	Espaçamento entre linhas de controle	10 Km	10 Km	10 Km
	Orientação das linhas de controle	E-W	E-W	E-W
Métodos Geofísicos	Magnetometria - Taxa de amostragem (s)	0.10 s	0.1 s	0.1 s / 0.01 s
	Aeromagnetômetro	Geometrics G822A	Geometrics G822A	Aeromaster VN2001, PicoEnvirotec MMS4 e KroumVS Instruments - KAMAG 4
	Gamaespectrometria - Taxa de amostragem (s)	1 s	1 s	1 s
	Aerogamaespectrômetro	Radiations Solutions RS-500 (1024 canais)	Radiations Solutions RS-500 (1024 canais)	Pico Envirotec GRS410 (512 canais), Exploranium GR820 (256 canais) e Radiations Solutions RS-500 (1024 canais)

Tabela 1 – Especificações técnicas do levantamento de dados do Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117), Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e do Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093).

3.4 SOFTWARE

O Oasis Montaj versão 9.4 da GEOSOFT foi o software utilizado ao longo desse trabalho. Essa ferramenta nos permitiu operar diretamente com os bancos de dados dos projetos aerogeofísicos e, dessa forma, foi possível efetuar o processamento dos dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria, a inversão do vetor de magnetização. Além disso, através do Oasis montaj foi possível integrar os produtos geofísicos provenientes do processamento dos dados com os demais materiais abordados nesse trabalho como, por exemplo, o mapa geológico do estado do Rio de Janeiro. O Oasis montaj também foi utilizado para gerar os mapas finais dos produtos do processamento de dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria.

IV. MÉTODOS

4. APRESENTAÇÃO

O presente estudo adotou o seguinte fluxo de trabalho: **conversão cartográfica dos dados de aerogeofísica, análise dos dados, processamento** efetivo dos dados de **magnetometria e gamaespectrometria** e, por fim, a **inversão do vetor de magnetização**. Todos esses procedimentos serão abordados no presente capítulo. A figura 7 ilustra o fluxograma esquemático simplificado da metodologia aplicada ao presente estudo.

A conversão cartográfica dos dados aqui definida está relacionada aos processos de padronização do sistema de coordenada dos bancos de dados. Em seguida, os dados foram submetidos à uma análise acerca das características relacionadas ao levantamento tais como a identificação das áreas sobrevoadas, por exemplo. Nessa etapa da análise de dados, o objetivo central era investigar se os dados dos projetos aerogeofísicos eram coerentes, concisos e se poderiam ser compilados para compor a geofísica do estado do Rio de Janeiro. Após essa preparação inicial, os dados foram, enfim, submetidos ao processamento de magnetometria, gamaespectrometria incluindo o MVI. Todas essas operações foram efetuadas no *software* Oasis montaj versão 9.4 da Geosoft.

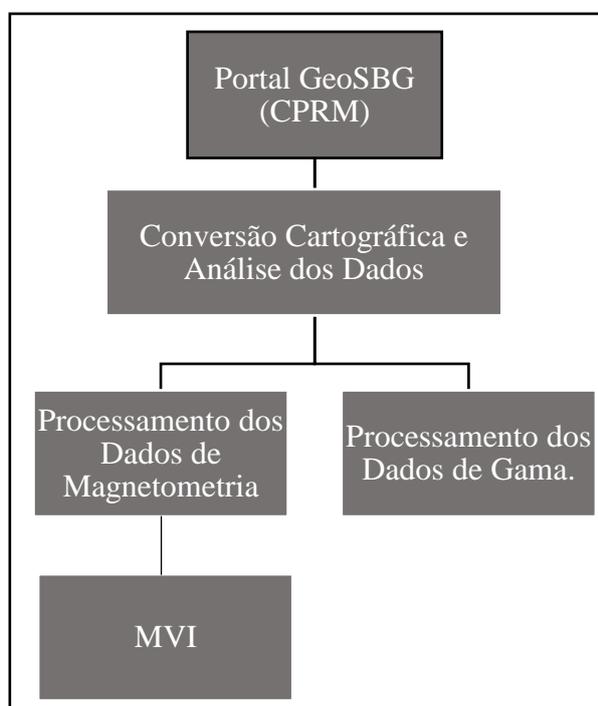


Figura 7: Fluxograma simplificado da metodologia abordada.

4.1 CONVERSÃO DA PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA DOS DADOS DE AEROGEOFÍSICA

Através dos relatórios técnicos dos levantamentos aerogeofísicos foi observado que regiões prospectadas pelos distintos levantamentos são relativamente grandes, e por conta disso, abrangem múltiplos fusos. Para operar com dados orientados em diferentes zonas UTM foi necessário padronizar os sistemas de coordenada para os três projetos aerogeofísicos

Converter todos os bancos de dados para o mesmo sistema de projeção de coordenada métrica Universal Transversa de Mercator (UTM) foi a solução encontrada para manusear esses distintos projetos relativos aos múltiplos fusos. Os seis bancos de dados envolvidos nesse estudo foram carregados no Oasis montaj, onde foram imediatamente reprojitados para a projeção métrica *Polyconic Brasil*, Datum WGS 84 (*World Geodetic System*) assumindo meridiano central 54°WGr, paralelo 0°, falso leste em 5.000.000, falso norte 10.000.000, elipsoide WGS-84 e unidade de medida em metros.

Essa solução do sistema de coordenada métrica foi fundamental para permitir operar com os distintos levantamentos simultaneamente e facilitar, posteriormente, as operações matemáticas e computacionais tais como, por exemplo, a interpolação de dados, aplicação de filtros e entre outras manipulações usuais do fluxo de processamento de dados de magnetometria e gamaespectrometria. Como resultado desse processo obtivemos os seis bancos de dados georreferenciados para o mesmo sistema de projeção, assim os dados estavam prontos para seguirem o fluxo de trabalho.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS DE AEROGEOFÍSICA

Essa etapa consistiu na análise das linhas de aquisição. Através desse procedimento foi possível testar um dos principais tópicos do presente estudo: se os dados dos projetos aerogeofísicos unidos poderiam compor integralmente a geofísica do estado do Rio de Janeiro. Para isso, os dados dos distintos projetos aerogeofísicos deveriam se apresentar tecnicamente similares e as suas respectivas áreas de levantamento deveriam ser tangentes entre si ou suas extremidades deveriam apresentar sobreposição. A figura 8 é um fluxograma esquemático sobre os procedimentos executados nos itens 4.1 e 4.2.

Ainda nessa etapa de análise foram feitas observações sobre as adversidades relacionadas à aquisição dos dados de geofísica e à natureza dos dados corrigidos, tendo em

vista que o presente trabalho operou diretamente com dados de magnetometria e gamaespectrometria previamente corrigidos pelas empresas contratadas pela CPRM.

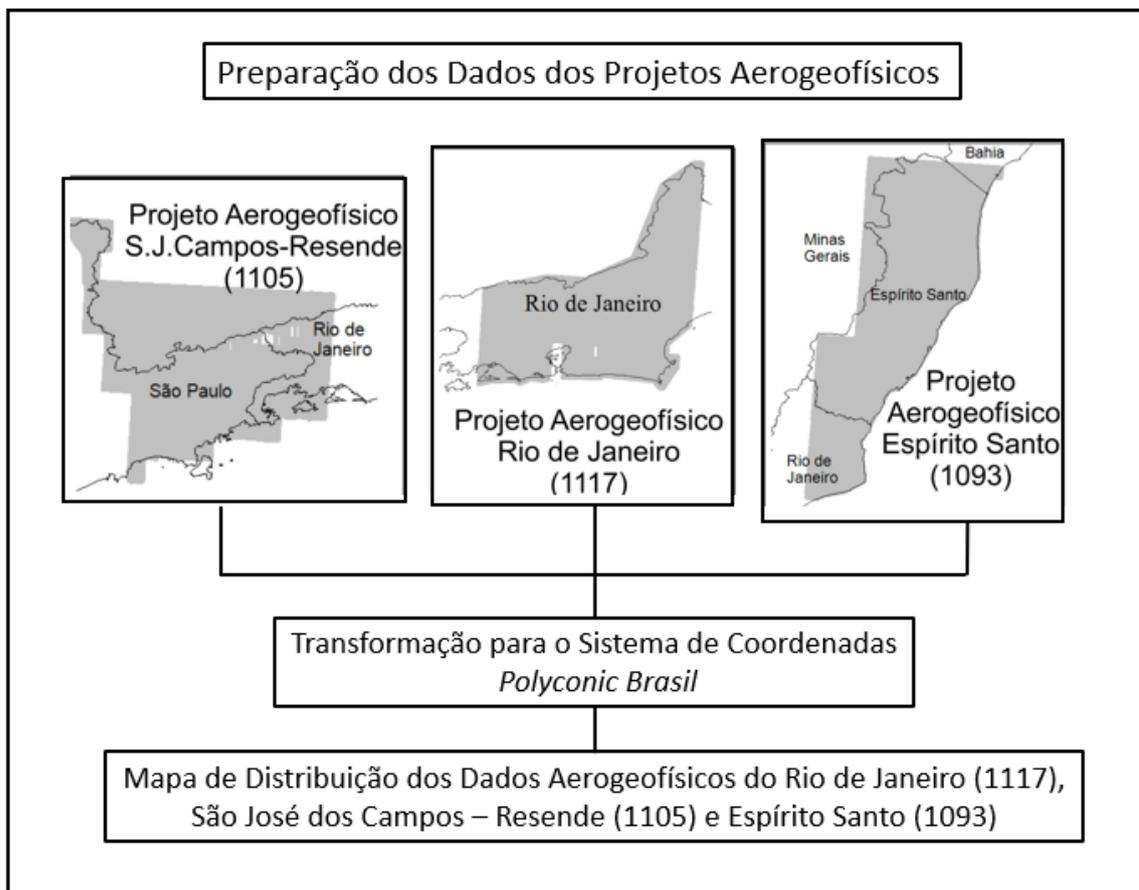


Figura 8: Fluxograma detalhando os itens 4.1 e 4.2.

Essas observações são fundamentais para o presente estudo e se destacam por conta da influência que podem exercer sobre os produtos finais do processamento de dados de magnetometria e gamaespectrometria. Problemas associados aos levantamentos aéreos são comuns e podem ser minimizados pelo processamento. Por conta disso, é fundamental analisar e registrar eventuais problemas da aquisição tais como, por exemplo: pontos não amostrados, espaçamentos irregulares entre as linhas de voo e entre outros. Além disso, entender como as correções foram aplicadas aos dados brutos também é importante principalmente porque o presente trabalho aborda o processamento de dados previamente corrigidos.

Essa análise do dado geofísico pode ser feita por meio do próprio relatório técnico da aquisição e por uma análise da distribuição espacial dos dados em mapa. No caso do presente estudo ambas as abordagens foram aplicadas.

A tabela 1 foi construída a partir das informações extraídas dos relatórios técnicos dos projetos aerogeofísicos e ilustra as principais características de todos os levantamentos aéreos utilizados para compor o presente trabalho. Através dessa tabela pôde ser constatado que os dados de aerogeofísica dos distintos projetos possuem características técnicas de aquisição iguais ou similares. Nesse sentido, todos os três projetos envolvidos apresentam dados de magnetometria e gamaespectrometria, linhas de voo com direção norte sul, espaçadas de 500 m, altura de voo estabelecida em 100 m e linhas de controle com direção leste oeste espaçada em 10 Km.

Também foi observado que a taxa de amostragem entre os projetos Rio de Janeiro (Projeto 1117) e Espírito Santo (Projeto 1093) eram iguais entre si para ambos os métodos, e similares para o projeto São José dos Campos-Resende (Projeto 1105), no qual a divergência está associada à uma de alta taxa amostragem de dados de magnetometria. Outra observação importante entre os projetos é a diferença temporal entre as aquisições e os distintos equipamentos utilizados ao longo do levantamento do Projeto 1105.

A disposição de dados ao longo da área de estudo, ilustrado pela figura 9, abrange toda região e exibe a distribuição das linhas de voo relativas aos projetos Rio de Janeiro (Projeto 1117), São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Espírito Santo (Projeto 1093). Com objetivo de melhor avaliar e distinguir as áreas prospectadas, a distribuição das linhas de voo de cada projeto foi plotada com uma cor distinta, onde o azul responde à aquisição do projeto 1105, laranja o projeto 1117 e verde o projeto 1093.

Através desse mapa (Figura 9) foi possível verificar que a área de cobertura total dos dados contemplava toda área de estudo e as regiões adjacentes entre projetos foram completamente amostradas pelos seus respectivos levantamentos. Somando essa análise com o fato constatado, que os distintos projetos possuem características técnicas similares, é possível confirmar que a união entre os dados aeromagnetometria e aerogamaespectrometria dos múltiplos levantamentos poderia ser efetuada para compor a geofísica integral do estado do RJ.

Além disso, por meio do mapa de distribuição de dados dos projetos aerogeofísicos também foram identificadas regiões não amostradas (algumas áreas em branco) e linhas de voo incompletas dentro de cada levantamento. Apesar desse problema não ser frequente ao longo das bases de dados, ele é comum aos três projetos aerogeofísicos. O registro dessa ausência de amostragem é fundamental para as etapas posteriores do processamento, principalmente para a etapa de interpolação de dados. Contudo, no geral as linhas de voo não apresentaram grandes problemas.

No caso do projeto São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) a área mais crítica encontrada foi a região do Itatiaia no sul fluminense, no qual o dado apresenta intervalos de pontos de amostragens maiores que 15 Km ao longo da linha de voo planejada. Enquanto as áreas de ausência de amostragem do projeto Espírito Santo (projeto 1093) apresentam em média 6 Km na linha de voo. O projeto Rio de Janeiro (Projeto 1117) também apresenta duas regiões não amostradas com intervalos que chegam até 15 Km, como é o caso da região da Baía de Guanabara. Essas regiões estão classificadas na figura 9 e são exibidas em detalhe na figura 10.

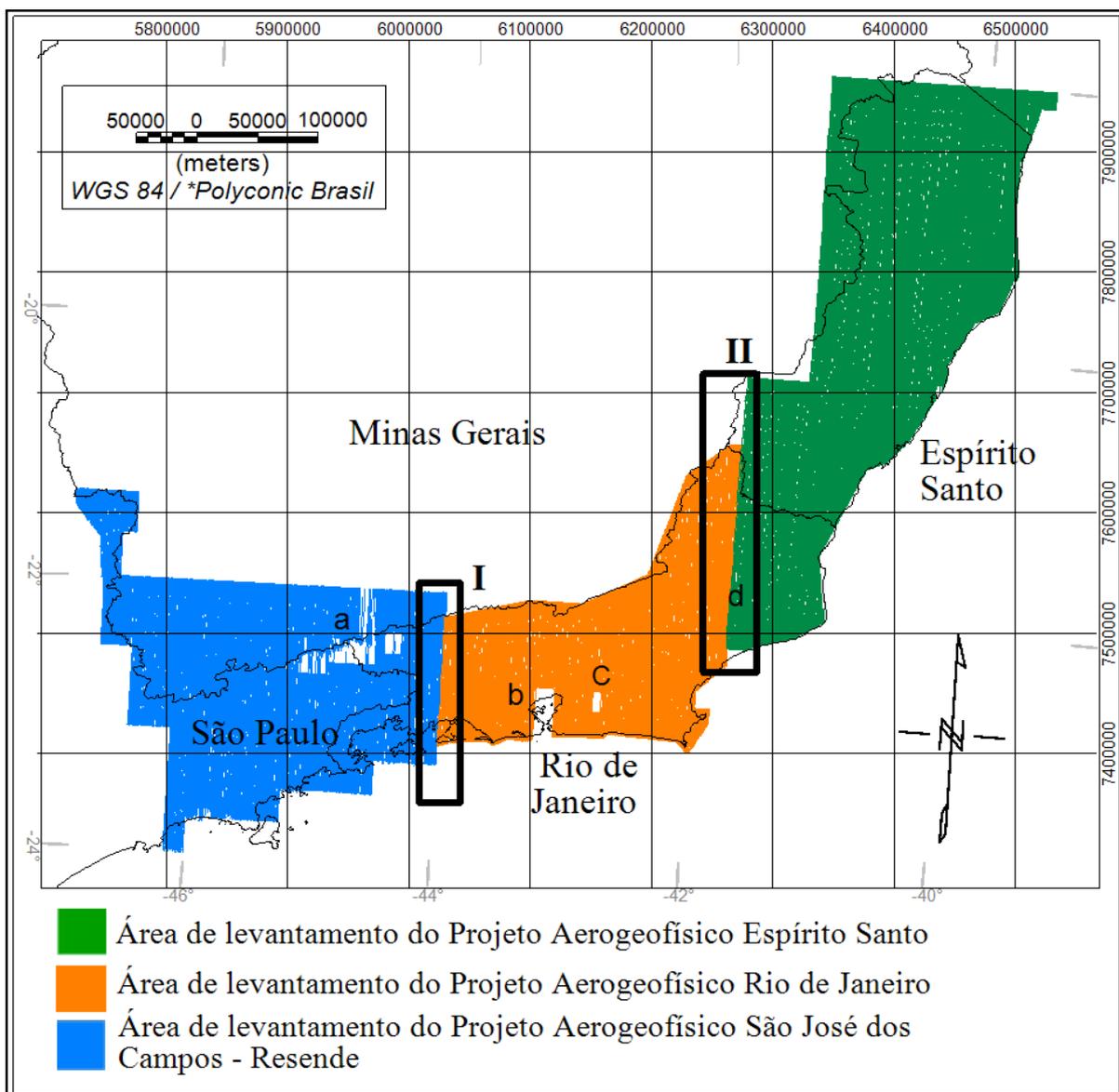


Figura 9: Mapa de distribuição de dados dos projetos aerogeofísicos Rio de Janeiro (Projeto 1117), São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Espírito Santo (Projeto 1093).

Através do mapa de distribuição de dados dos projetos aerogeofísicos também foi possível constatar que há uma uniformidade das malhas de aquisição e também foi observada

uma grande taxa de amostragem em uma única direção, no caso a direção norte e sul apresentando amostras, no máximo a cada 70 m. Na direção leste oeste predomina o espaçamento de 500 m entre duas medições.

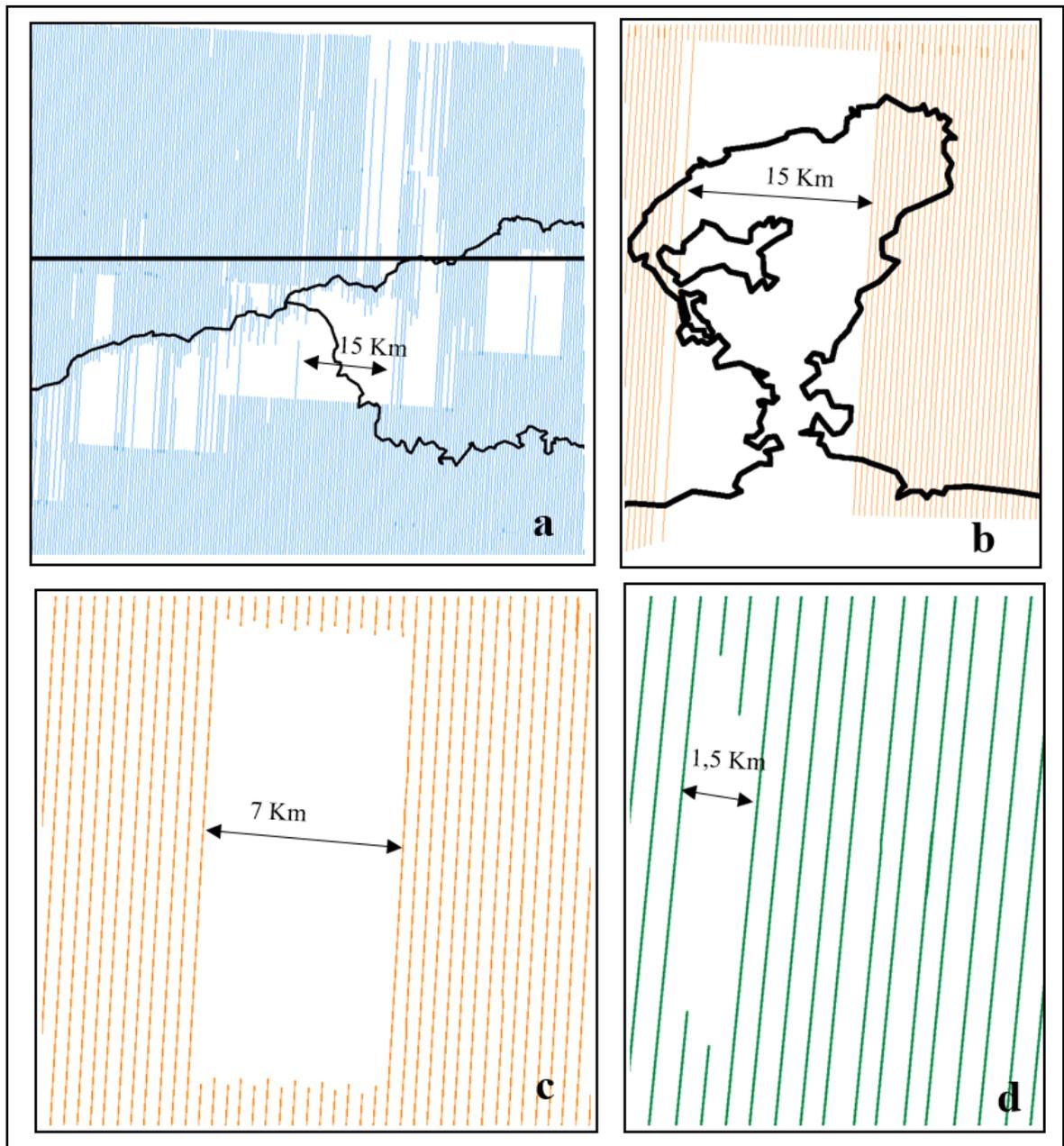


Figura 10: Em detalhe, áreas não sobrevoadas pelos projetos aerogeofísicos. a) Área não amostrada pelo projeto 1105. b) Região não amostrada sobre a Baía de Guanabara. c) Região não amostrada pelo projeto 1117. d) Área não levantada pelo projeto 1093.

Nas áreas de extremidade entre projetos há superposição de linhas de voo relativas aos três levantamentos distintos, conforme ilustra a figura 11, no qual as linhas em laranjas representam o levantamento do Projeto 1117, linhas azuis do levantamento 1105 e linhas verdes

do projeto 1093. Essa análise é fundamental para maior entendimento da natureza dos dados para a fase seguinte, o processamento de dados de magnetometria e gamaespectrometria.

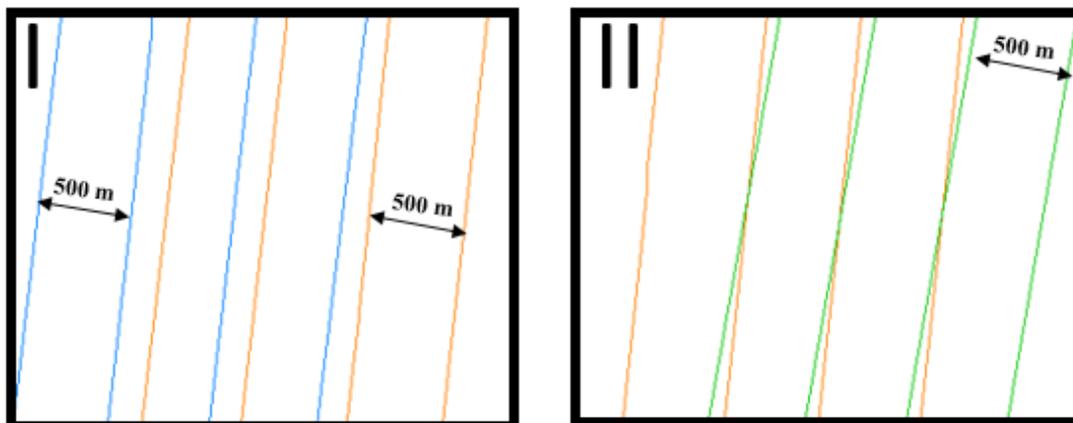


Figura 11: Imagem das linhas de voo em detalhe as áreas comuns aos projetos. I) Área limite entres os projetos Rio de Janeiro (linhas laranja) e São José dos Campos-Resende (linhas azuis). II) Área limite entres os projetos Rio de Janeiro (linhas laranjas) e Espírito Santo (Linhas Verdes).

Ao fim dessa fase de controle de qualidade e preparação dos dados foi comprovado que os projetos podem ser unidos, as áreas entre projetos apresentam sobreposições de linhas de voo nas extremidades entre os três projetos. Também foi observado que há regiões não amostradas dentro de cada projeto aerogeofísico. Após essa etapa, os dados de aeromagnetometria e aerogamaespectrometria prosseguiram para a etapa dos respectivos processamentos com seus bancos de dados georreferenciados para o mesmo sistema de projeção cartográfica.

4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS DE MAGNETOMETRIA

O processamento de dados de aeromagnetometria envolveu a preparação do banco de dados, a interpolação, o micronivelamento e a elaboração de *grids*. Por meio desse procedimento foram obtidos o **campo magnético anômalo (CMA)**, a **primeira derivada vertical (DZ)**, o **senal analítico (ASA)**, a **redução ao pólo (RTP)**, **inclinação do sinal analítico (*tilt derivate* ou ISA)** e a **diferença da continuação ascendente**. A primeira etapa do tratamento consistiu na preparação do banco de dados de magnetometria incluindo a compilação dos dados para uma única base de dados, recorte da área de estudo e outros ajustes.

O objetivo dessa primeira fase era extrair um único banco de dados com todas as informações de magnetometria do estado do Rio de Janeiro visando otimizar as demais etapas do processamento e, paralelamente, a inversão dos dados de magnetometria, que será melhor descrita a diante. As demais etapas do processamento de dados de magnetometria envolveram operações com o canal do campo anômalo reduzido ao IGRF e com todas as etapas de pré-processamento executadas. A figura 12 ilustra de forma simplificada o fluxo de trabalho aplicado aos dados de magnetometria.

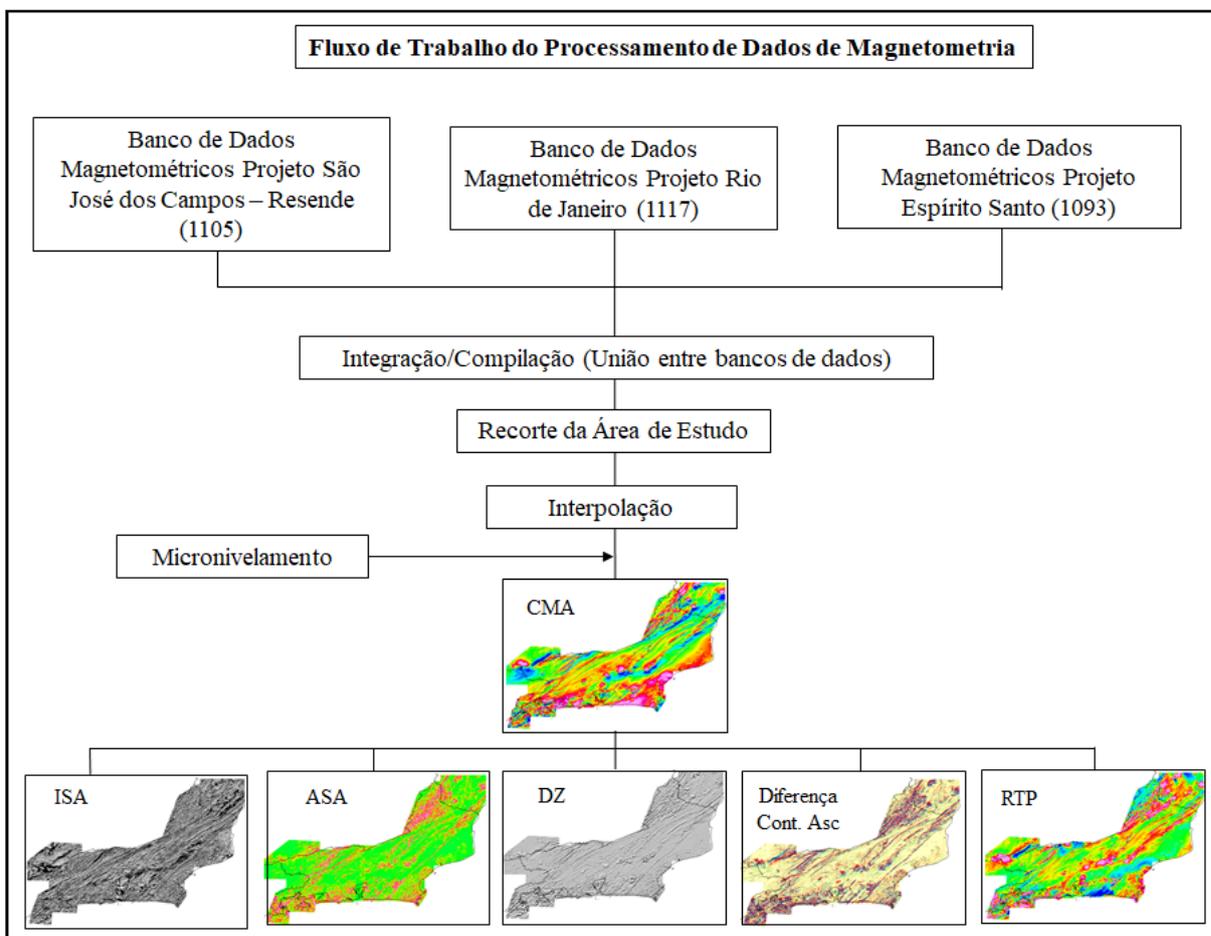


Figura 12: Fluxo de trabalho simplificado aplicado aos dados magnetométricos.

4.2.1 Preparação do Banco de Dados de Magnetometria

A primeira fase consistiu na análise de valores espúrios que poderiam configurar ruídos associados à má calibração dos equipamentos ou a erros das correções efetuadas no pré-processamento, no entanto os dados dos três projetos aerogeofísicos analisados em perfis não apresentaram problemas significativos e por conta disso, foram mantidos.

Por outro lado, ao longo do trabalho foi observada a presença de ruídos bem definidos com direção norte-sul nas regiões de sobreposição de linhas de voo relativa aos distintos projetos, por conta disso, foi necessário eliminar essas linhas de voo sobrepostas antes de efetuar a compilação dos três levantamentos. Através do mapa de distribuição de dados dos projetos aerogeofísicos (Figura 9), que foi gerado na etapa anterior, as linhas de voo sobrepostas foram identificadas e, por fim, removidas do banco de dados do seu respectivo projeto.

Através da figura 11 é possível visualizar a sobreposição de linhas de voo do projeto Espírito Santo (projeto 1093) sobre as linhas de voo do projeto Rio de Janeiro (projeto 1117) na área II. Assim foi necessário remover do projeto 1093 uma quantidade unitária de linhas sobrepostas do seu banco de dados. É importante ressaltar que a maioria dessas linhas eliminadas estavam incompletas em termos de amostragem. Em relação à área I, as linhas de voo do projeto 1117 sobrepostas às linhas de voo do projeto 1105 foram eliminadas. Essas linhas foram removidas diretamente do banco de dados do projeto 1117.

Após essas correções de sobreposições de linhas de voo, a compilação entre os dados de aeromagnetometria dos projetos Rio de Janeiro (Projeto 1117), São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Espírito Santo (Projeto 1093) poderia ser efetuada. Como todos os bancos de dados de magnetometria estavam orientados para a mesma projeção cartográfica, foi possível realizar a compilação unindo os três bancos dos distintos levantamentos em apenas um. Esse método foi escolhido para otimizar etapas posteriores do processamento de dados de magnetometria, tendo em vista que as operações poderiam ser aplicadas apenas a um único banco de dados a partir dessa etapa.

Por outro lado, o produto final dessa união entre projetos aerogeofísicos correspondia uma ampla região que se estendia muito além do estado do Rio de Janeiro, essa área englobava do norte estado de São Paulo até o sul da Bahia. Por isso os dados compilados de magnetometria foram limitados à área de estudo através do recorte do banco de dados. Com isso foi possível obter o banco de dados de magnetometria correspondente ao estado do Rio de Janeiro, esse banco de dados foi o material utilizado para todas as etapas posteriores do processamento de dados magnetométricos.

4.2.2 Interpolação dos Dados de Magnetometria

Com o intuito de gerar uma imagem relativa ao conteúdo dos dados de magnetometria, ou seja, o *grid*, o canal do campo magnético anômalo (CMA) foi submetido ao processo de interpolação por meio do método da mínima curvatura (RANGRID). O procedimento de interpolação é fundamental para ajustar os dados à uma malha regular e, além

disso, por conta da alta densidade de amostragem ao longo da linha de voo em contraste com a pouca amostragem na direção paralela às linhas de controle, se faz necessário uso de filtros anti-falseamento ao longo das linhas de voo para se obter um conteúdo de frequência espacial proporcional para ambas as direções. (Luyendyk,1997)

Diversos métodos de interpolação foram testados baseados na disposição linear e direcional (Norte – Sul) dos pontos de amostragens, no entanto o método da mínima curvatura foi o que melhor gerou resultados. Esse método é comumente utilizado para dados de gravimetria e gamaespectrometria, que são levantamentos que no geral podem se apresentar sobre uma distribuição dispersa, mas o método da mínima curvatura também se comporta bem para um conjunto de dados aeromagnetométricos lineares com alta densidade de amostragem em uma única direção.

Esse interpolador iterativo ajusta os valores dos nós dos *grids* com base na média do inverso da distância entre pontos de amostragem para uma superfície suavizada com valores mais próximos ao dado original (Swain, 1976 e Briggs,1974). Baseado na frequência de *Nyquist*, o tamanho da célula para a interpolação foi fixado em $\frac{1}{4}$ do espaçamento da amostragem para evitar perdas de informação e falseamentos (*aliasing*) (Silva,1999, Blum 1999). Nesse sentido e tendo em vista que o espaçamento entre as linhas de aquisição é de 500m, o tamanho da célula unitária determinado para a interpolação apresenta 125 m.

Contudo, é importante ressaltar que os registros e os produtos gerados na etapa do controle de qualidade indicavam alguns poucos locais não amostrados na base de dados. Com intuito de preencher essas áreas em branco foi necessário utilizar, em paralelo a interpolação de mínima curvatura, uma extrapolação por meio do *blanking distance* para se obter informação interpolada nessas regiões que não apresentam uma taxa de amostragem equivalente à do restante do conjunto de dados. O *blanking distance* permite interpolar dados usando pontos conhecidos nas regiões adjacentes às áreas vazias de amostragem e, dessa forma, completar o preenchimento do *grid*. O parâmetro utilizado para a extrapolação foi baseado na maior área não amostrada, no caso 15 Km. Ao fim desse procedimento foi obtido o *grid* do campo magnético anômalo (CMA) reduzido do IGRF da área de interesse.

4.2.3 Micronivelamento

A próxima etapa do processamento dos dados de aeromagnetometria consistiu no micronivelamento (decorrução). A necessidade de se aplicar essa correção surgiu após a identificação de ruídos bem definidos e alongados na direção das linhas de voos, principalmente, nas regiões de sutura entre os distintos projetos mesmo sem haver sobreposição

entre as linhas de aquisição. A solução encontrada para esse problema foi a decorrugação proposta por Minty (1991).

A decorrugação é uma técnica que opera no domínio da frequência e permite remover do *grid* do campo anômalo feições geofísicas que não correspondem aos contrastes litológicos. Essas feições são bem definidas, alongadas e paralelas à direção da aquisição dos dados e, por isso podem ser facilmente identificadas como ruídos. Esse tipo de ruído apresenta altas frequências com comprimento de onda longitudinal maiores que o espaçamento das linhas de controle e os comprimentos de ondas transversais aproximadamente duas vezes o espaçamento entre as linhas de amostragem e estão associados à uma superamostragem (Minty, 1991; Luyendyk, 1997).

Para analisar se o micronivelamento atingiu um bom resultado é importante, em um primeiro momento, comparar visualmente o *grid* original com o *grid* gerado pelo processo de decorrugação buscando identificar se houve de fato a remoção dos ruídos bem definidos. Através dessa comparação também é possível avaliar até que ponto houve uma melhora da relação sinal - ruído do novo produto, tendo em vista que esse procedimento configura remoção de parte do sinal. É importante ressaltar que no domínio da frequência não há distinção entre anomalias e ruídos. Por conta disso é possível realizar múltiplos testes com diferentes comprimentos de ondas para comparar os resultados e avaliar se o procedimento foi satisfatório. A figura 13 é o *grid* da região entre os projetos 1117 e 1093 antes e depois do procedimento do micronivelamento.

Para o presente estudo, o micronivelamento teve início com a elaboração do *grid* de erro através de uma filtragem aplicada diretamente ao *grid* do campo anômalo. Esse procedimento foi realizado no domínio da frequência, no qual o CMA foi exposto a uma combinação dos filtros de passa-alta do tipo *butterworth* com o **Cosseno Direcional**. O comprimento da onda de corte para o filtro de passa alta foi equivalente a quatro vezes o espaçamento entre as linhas de voo, enquanto o parâmetro do filtro direcional se manteve paralelo a direção da aquisição dos dados. Com isso foi obtida uma malha regular com comprimentos de ondas maiores que 2000m na direção norte-sul.

Posteriormente, o *grid* de erro foi subtraído do *grid* do campo anômalo gerando, conseqüentemente, o *grid* CMA decorrugado. No caso do presente estudo foi constatado que o procedimento da decorrugação gerou resultados satisfatórios na primeira filtragem, o produto final apresentou uma boa relação sinal ruído, os ruídos identificados inicialmente foram removidos e as anomalias geofísicas se mantiveram.

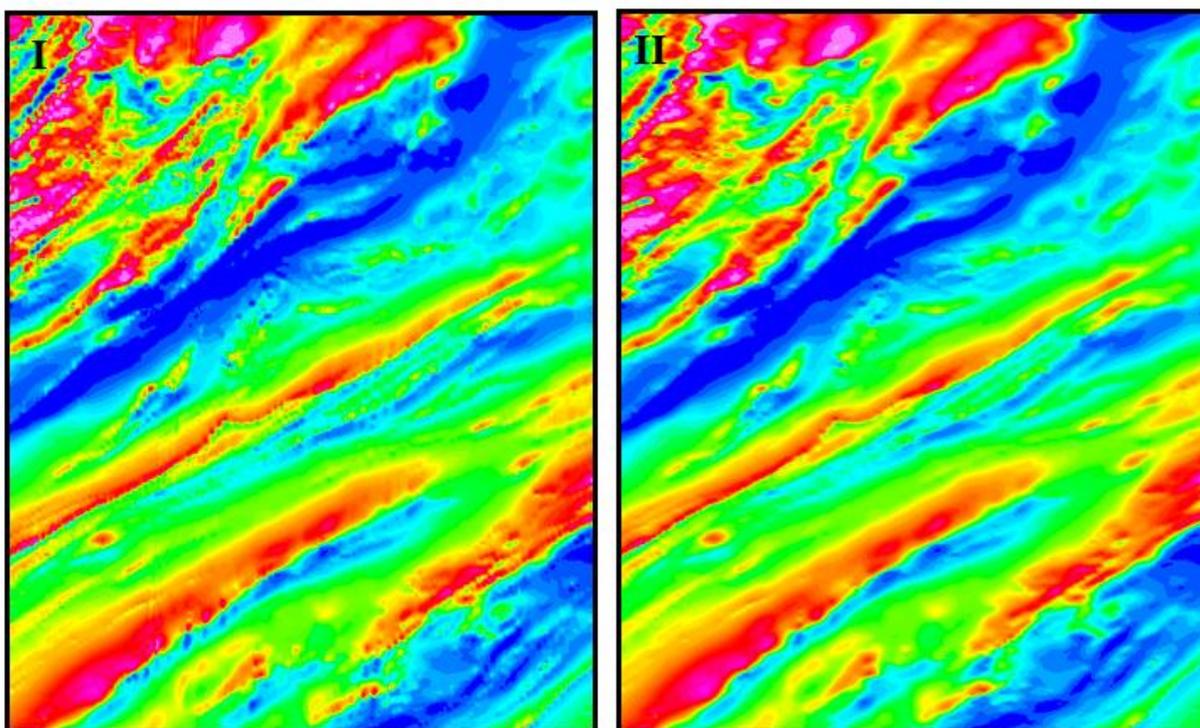


Figura 13: I) Antes do procedimento do micronivelamento. II) Resultado obtido após o micronivelamento.

4.2.4 Primeira Derivada Vertical

A primeira derivada vertical é utilizada para ressaltar corpos na direção vertical. Esse filtro é aplicado através do domínio da frequência no qual as derivadas das anomalias são calculadas em relação à direção vertical (Z). Através da primeira derivada vertical é possível definir os limites das anomalias magnéticas e destacar as altas frequências com baixo comprimento de ondas evidenciando fontes mais rasas em detrimento das fontes mais profundas.

Por conta disso o produto da primeira derivada vertical é comumente combinado com outros produtos que apresentam características superficiais, um exemplo disso é a combinação entre o mapa ternário do Tório, Urânio e Potássio com o produto da primeira derivada vertical para gerar o mapa litoestrutural geofísico de uma região. A equação 1 evidencia o filtro da primeira derivada vertical, onde A é atribuído à amplitude da anomalia magnética.

$$DZ = \left(\frac{\delta A}{\delta Z} \right)$$

Equação 1: Cálculo da Derivada Vertical e seu produto apresenta unidade em nT/m.

4.2.5 Amplitude do Sinal Analítico

Descrito inicialmente por Nabighian (1972,1974), a amplitude do sinal analítico (ASA) em duas dimensões permite uma melhor definição das bordas dos corpos e suas geometrias e colabora na identificação de estruturas. O sinal analítico tende a centralizar maiores amplitudes sobre as suas respectivas fontes e através do seu produto pode se identificar os principais domínios magnéticos na área de estudo.

O resultado obtido pela amplitude do sinal analítico equivale à raiz quadrada do somatório do quadrado da primeira derivada horizontal e vertical, a equação 2 evidencia esse cálculo. A partir da equação pode se ressaltar que o ASA 2D é independente da direção do vetor de magnetização levando em consideração apenas as derivadas do campo. Cabe ressaltar que o Sinal Analítico gera um resultado de gradiente e, embora centralize as anomalias de maiores amplitudes, não pode, portanto, ser comparado diretamente com o produto da redução ao pólo. A principal vantagem do ASA é poder delimitar e simplificar a geometria da anomalia magnética.

$$|ASA(X, Y)| = \sqrt{\left(\frac{\delta A}{\delta X}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{\delta Y}\right)^2}$$

Equação 2: Cálculo da amplitude do sinal analítico e seu produto apresenta unidade em nT/m.

No geral, para o presente estudo, o produto da amplitude do sinal analítico se mostrou satisfatório, para ilustrar isso a figura 14 e 15 apresentam exemplos. A Figura 14 mostra o perfil de uma linha de voo da base de dados com anomalias, no qual a porção superior da imagem ilustra o caráter dipolar das anomalias do campo magnético anômalo e a porção inferior exibe o resultado após o processo da ASA, as anomalias exibidas em perfis na figura 14 são apresentadas em forma de *grid* na figura 15.

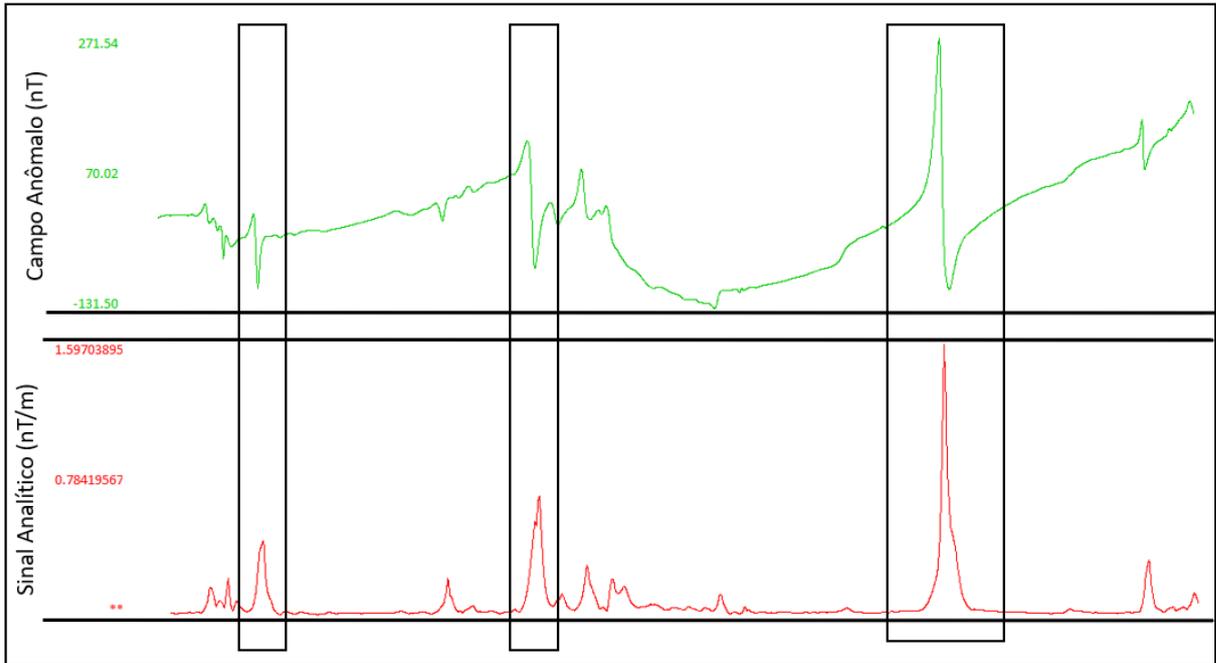


Figura 14: Comparação entre perfis do canal do CMA na porção superior da imagem e o canal gerado após a filtragem pela ASA. Os quadrados evidenciam as anomalias magnéticas.

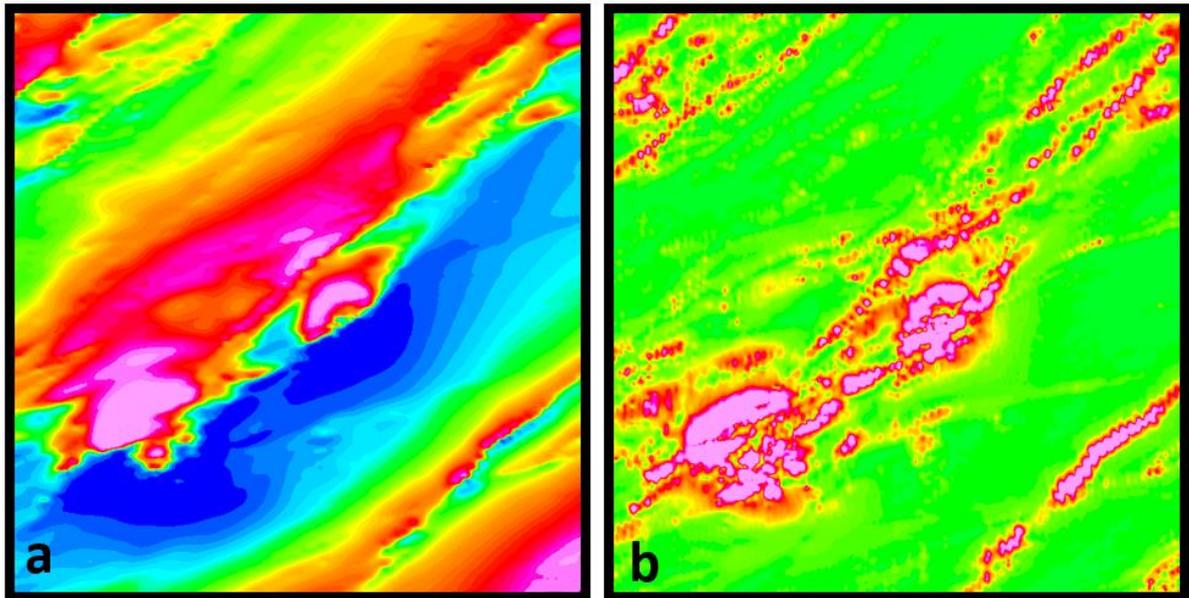


Figura 15: Comparação entre o *grid* do CMA (a) e o *grid* gerado pela ASA (b).

4.2.6 Redução ao Pólo

A prática da redução ao pólo é extensivamente utilizada na área de geociências na tentativa de focalizar as anomalias sobre suas fontes causadoras e, dessa forma, facilitar a interpretação dos dados magnetométricos. Introduzida por Baranov (1957) e Baranov & Naudy (1964) é um procedimento essencialmente matemático no qual uma anomalia magnética localizada em qualquer porção da Terra, que se apresenta inclinada em relação ao campo magnético, pode ser

reproduzida como se estivesse localizada no extremo terrestre, nos pólos. Esse procedimento, em teoria, aloca a anomalia sobre o máximo da anomalia magnética bipolar e, dessa forma, transforma as anomalias bipolares em anomalias de um único pólo, ou seja, focaliza a anomalia próxima à possível fonte causadora. No entanto, é importante ressaltar que esse procedimento se baseia no princípio que nos pólos a magnetização induzida é vertical desconsiderando a magnetização remanescente. A equação da redução ao pólo utilizada para o presente estudo faz uso do complemento da inclinação magnética. Os parâmetros utilizados são I' para a inclinação da correção de amplitude, I é a inclinação geomagnética do campo, D a declinação geomagnética e θ a latitude. A fórmula é dada por:

$$R(\theta) = \frac{[SEN(I) - iCOS^2(I) COS(D - \theta)]^2}{[SEN^2(I') + iCOS^2(I') COS^2(D - \theta)]. [SEN^2(I) + iCOS^2(I) COS^2(D - \theta)]}$$

Equação 3: A equação da redução ao pólo.

É possível observar através dessa equação que quando o ângulo da latitude tende a zero, o denominador explode por conta da função seno. Nesse sentido, regiões localizadas mais distais dos pólos e próximas ao equador são restritas a baixas latitudes magnéticas e, dessa forma, a redução ao pólo se tornar instável (Silva, 1986). Além disso, é importante ressaltar que a forma da anomalia magnética varia para diferentes latitudes magnéticas (Spector & Grant, 1970).

Por outro lado, é preciso ressaltar que esse procedimento é independente da direção do vetor de magnetização (Telford *et al.*,1990). Dessa forma, regiões no qual a magnetização remanescente é intensa são negligenciadas e é importante ressaltar que a magnetização remanescente, principalmente no território brasileiro, não pode ser desconsiderada (Cordani & Shukowsky,2009).

Contudo, a redução ao pólo ainda se mantém como um dos principais produtos do processamento de dados de magnetometria e é recomendada para análises qualitativas. Por conta disso e para efeitos de comparação e estudo, a redução ao pólo foi executada para os dados magnetométricos do estado do Rio de Janeiro.

4.2.7 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou *Tilt Derivative*

A *Tilt Derivative* ou inclinação do sinal analítico (ISA) é um produto complementar do processamento de dados de magnetometria e, no geral, permite a estimativa do mergulho do

gradiente da anomalia magnética e o contraste da susceptibilidade magnética colaborando, assim, com a investigação da geologia da área de estudo com ênfase na análise estrutural (Thurston & Smith, 1997 In Blum, 1999). Através desse procedimento é possível realçar lineamentos magnéticos que podem estar associados às falhas geológicas, diques ou contrastes litológicos.

Descrita inicialmente por Miller & Singh (1994), a inclinação do sinal analítico é definida pelo arco tangente da razão entre a derivada vertical pela amplitude do gradiente horizontal total ou amplitude do sinal analítico (Equação 4). A *Tilt Derivative* normaliza a DZ em relação ao ASA e, dessa forma, gera bons resultados mesmo na presença de ruídos (Verduzco *et al.*, 2004). Através da equação 4 pode-se concluir que conteúdos de menor gradiente horizontal apresentam o maior ângulo, diante disso as anomalias desse produto tendem a se localizar sobre a fonte causadora. Em contraste com os conteúdos de maiores gradientes horizontais associados às bordas e limites dos corpos, que tendem a zero. Os menores índices da inclinação do sinal analítico apontam para regiões que estão distantes das anomalias magnéticas.

$$TDR(\theta) = \tan^{-1} \left(\frac{\delta A / \delta Z}{\sqrt{(\delta A / \delta Z)^2 + (\delta A / \delta Z)^2}} \right)$$

Equação 4: Cálculo da inclinação da amplitude do sinal analítico oscilando entre $\pm 90^\circ$.

Cabe ressaltar que o produto da inclinação do sinal analítico é uma imagem mais densa de conteúdo quando comparado com os demais produtos do processamento de dados de magnetometria. Tal produto de ordem 0 pode-se apresentar com uma escala monocromática em preto e branco para facilitar a interpretação regional.

4.2.8 Diferença da Continuação Ascendente

A continuação ascendente representa uma simulação de uma aquisição com altura superior à do atual levantamento, no caso do presente estudo a simulação foi efetuada para alturas superiores a 100m, ou seja, foram gerados a *upward continuation* para 100 m e 200 m. A intensidade do campo magnético é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto de medição e a fonte causadora (Brakely, 1995, Telford *et al.*, 1990). Nesse sentido e através do procedimento da continuação ascendente é possível ressaltar conteúdos de baixa frequência e grande comprimentos de ondas associados às fontes mais profundas atenuando, em contraste, conteúdos de ondas relativas as fontes mais rasas (Lima, 2015). Essa característica é evidente na equação do filtro da continuação ascendente no domínio da frequência, que está

estabelecida pela equação 5 (Reeves, 2005). Através dessa função é possível observar que quanto maior o número de onda, mais atenuado o sinal será, o que justifica o predomínio das anomalias regionais.

$$L(w) = e^{-hw}$$

Equação 5: Equação da continuação ascendente onde h equivale a continuação da altura e w o número de onda no domínio da frequência.

A diferença da continuação ascendente pode ser alcançada subtraindo dois *grids* de continuação ascendente com alturas distintas entre si. Através desse procedimento, além de ressaltar as anomalias residuais e suavizar os conteúdos regionais, também é possível minimizar ruídos. O produto da diferença da continuação ascendente pode se mostrar como uma potencial ferramenta para identificação de estruturas tais como falhas e diques. Dessa forma, a diferença da continuação ascendente executada para o presente estudo consistiu na subtração entre os *grids* gerados pela *upward continuation*.

4.3 PROCESSAMENTO DE DADOS DE GAMAESPECTROMETRIA

A radioatividade é um fenômeno natural no qual isótopos instáveis emitem partículas subatômicas de alfa (α), beta (β) e radiação eletromagnética gama (γ) para se tornarem átomos estáveis do ponto de vista energético. No âmbito da geofísica, apenas a radiação gama é detectada pelos equipamentos disponíveis e, além disso, fontes de radiação provenientes da superfície terrestre de interesse geológico se restringem aos isótopos de Tório (^{232}Th), Urânio (^{238}U) e Potássio (^{40}K), que se encontram presentes na composição da maioria das rochas (Ribeiro *et al.*, 2013). A figura 16 é o fluxo de trabalho da metodologia aplicado aos dados gamaespectrométricos.

Sobre uma análise detalhada de cada elemento, a principal ocorrência do Potássio está associada aos feldspatos potássicos ocorrendo também em micas, rochas ígneas félsicas (granitoides e sienitoides), rochas metamórficas (filitos, xistos e gnaisses), rochas sedimentares (folhelhos e argilitos) e argilominerais gerados pela diagênese ou por alteração hidrotermal (Ribeiro *et al.*, 2013). Esse elemento se diferencia do demais por apresentar alta mobilidade durante os processos relacionados ao intemperismo e quando lixiviado por minerais primários, o potássio é facilmente absorvido por argila minerais. Enquanto o Tório e o Urânio correspondem às maiorias dos minerais acessórios de rochas ígneas e metamórficas quartzo-

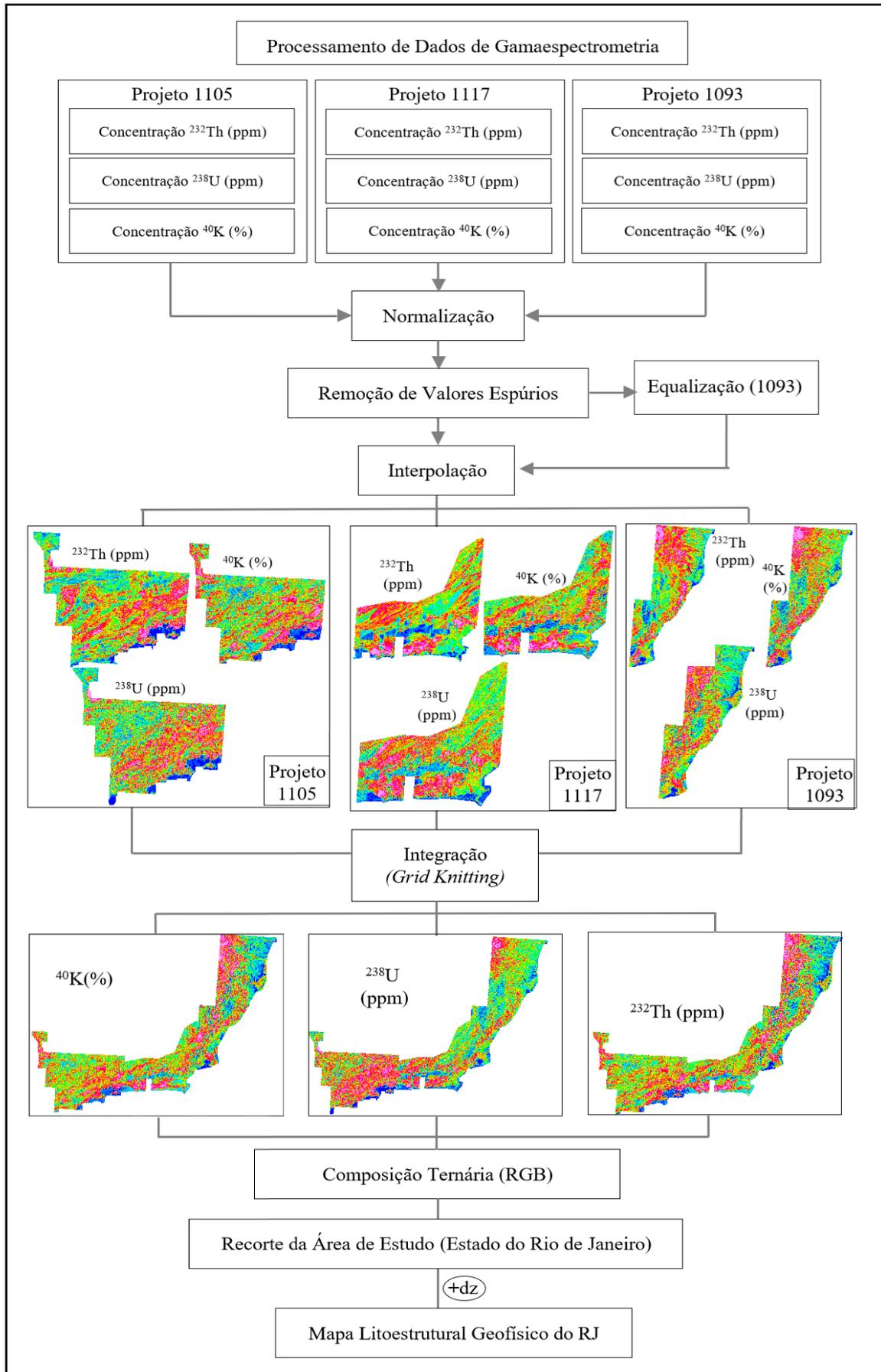


Figura 16: Fluxograma esquemático do processamento de dados gamaespectrométricos.

feldspáticas (Boyle, 1982). O Urânio é um elemento facilmente lixiviado e, portanto, sua concentração em sedimentos arenosos geralmente é baixa, contudo quando sua proveniência está associada às rochas ígneas com minerais mais resistentes de Tório e Urânio, a concentração desses radioelementos pode ser anômala como, por exemplo, em depósitos do tipo aluvionar ou litorâneos (Vasconcellos, 1994). O Tório, por outro lado, é estável durante o processo de intemperismo e pode se concentrar em depósitos de areia contendo minerais pesados. Por conta disso, para o presente estudo os produtos abordados pelo processamento de dados gamaespectrométricos estão restritos aos mapas temáticos do **Potássio Anômalo, Tório Anômalo, Urânio Anômalo**, composição ternária entre os mapas de Potássio Anômalo, Tório Anômalo e Urânio Anômalo (**mapa ternário**) e o **mapa litoestrutural geofísico**, equivalente à composição ternária com o fator adicional do mapa da primeira derivada vertical. A natureza dos dados gamaespectrométrico é bastante sensível às variações das concentrações dos dados radioisótopos, por conta disso o presente trabalho consistiu em periódicas análises do comportamento estatístico dos dados de gama.

A primeira etapa envolveu a preparação dos dados, havia valores incondizentes com os aspectos dos canais de concentração dos elementos de Tório, Urânio e Potássio. Diferente da metodologia adotada nos dados magnetométricos, no caso dos dados de gama foi necessário operar cada projeto aerogeofísico separadamente e, posteriormente integrá-los e recortar a área de interesse. Os canais das concentrações dos três elementos dos projetos 1117, 1093 e 1105 foram interpolados gerando, dessa forma, nove *grids*. Os três *grids* de cada elemento foram agrupados em seguida com a ferramenta *grid Knitting* do *Oasis montaj*, a partir dos *grids* das concentrações foi possível obter o mapa da composição ternária e o mapa litoestrutural geofísico.

4.3.1 Preparação dos Dados de Gamaespectrometria

Através do gamaespectrômetro, a radiação detectada é convertida em pulsos elétricos, no qual a amplitude do pulso é proporcional à intensidade da incidência no cristal (Minty,1997). Posteriormente, é possível classificar cada radioisótopo pelo fotopico da janela de energia, que por sua vez varia no geral até 3 MeK (IAEA,2003). Após a aquisição, os dados adquiridos em contagens por segundo (cps) são convertidos em concentrações percentuais (%) e partes por milhão (ppm). Por conta disso, os canais corrigidos de ^{232}Th (ppm), ^{238}U (ppm) e ^{40}K (%), em teoria, não devem apresentar valores negativos. Partindo desse pressuposto que valores negativos não apresentam sentido físico, a primeira etapa do tratamento de dados

gamaespectrométrico consistiu na normalização dos valores dos três canais de Tório (ppm), Urânio (ppm) e Potássio (%).

No caso do Potássio foi necessário observar o percentual mais negativo e posteriormente somar esse valor ao canal. Para os demais elementos, valores negativos de concentração em ppm foram convertidos para *dummies*. Após a normalização, a próxima etapa do tratamento foi a remoção de valores espúrios com auxílio dos histogramas dos canais de concentração de ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K dos três projetos aerogeofísicos. Cerca de 5% dos dados apresentados foram associados aos valores espúrios e foram devidamente removidos das bases de dados constituindo, assim, os três canais das concentrações dos radioelementos corrigidos.

Em seguida foi observado através dos histogramas dos canais corrigidos que o projeto 1093 apresentava uma concentração mais elevada quando comparada com os demais projetos aerogeofísicos. Com o objetivo de unir os dados para compor a imagem ternária do estado do Rio de Janeiro foi, então, preciso equalizar os histogramas dos três canais dos radioisótopos do projeto Espírito Santo. Cada canal radioativo relativo à concentração do projeto 1093 foi multiplicado por um fator proporcional ao projeto 1117 e 1105.

4.3.2 Interpolação e Produtos de Gamaespectrometria

Com os canais de Tório (ppm), Urânio (ppm) e Potássio (%), a próxima etapa consistiu na interpolação dos valores, no qual foi gerado um *grid* de cada radioisótopo relativo ao seu projeto, assim foram obtidos no total nove *grids*. O mesmo método de interpolação utilizado no presente estudo para interpolar os dados de magnetometria também foi aplicado aos dados de gamaespectrometria, o método da mínima curvatura (RANGRID). O tamanho da célula também foi fixado em 125 m tendo em vista o espaçamento de 500 m das linhas de voo.

4.3.3 Procedimento de Integração de Dados de Gamaespectrometria

Diferente do método potencial, a integração dos dados de gamaespectrometria executada para abordagem do presente estudo foi mais robusta e elaborada, isso se deve pela natureza complexa e do comportamento estatístico dos dados gamaespectrométricos. Diversos testes foram efetuados para se obter a melhor união entre os temas de ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K dos distintos aerolevantamentos geofísicos. Esses testes de integração foram realizados através dos diferentes métodos de sutura disponíveis pelo *Grid Knitting* do Oasis montaj (Geosoft, 2007). Ao fim de cada sutura se observava a distribuição dos dados e em caso de extremo contraste entre os *grids* integrados um novo método de sutura era testado, se admitia uma boa sutura quando a distribuição do teor era similar para ambos.

4.3.4 Imagens Ternárias do Estado do Rio de Janeiro

Com os *grids* ^{40}K (%), ^{232}Th (ppm) e ^{238}U (ppm) cobrindo as áreas dos projetos 1093,1117 e 1105 integralmente foi possível obter, dessa forma, a composição ternária RGB (Red-Green-Blue) dos respectivos canais dos radioisótopos. Após a união entre os *grids* a área de estudo foi recortada. A partir dessa metodologia foi possível extrair a imagem ternária dos elementos ^{40}K (%), ^{232}Th (ppm) e ^{238}U (ppm) do estado do Rio de Janeiro. Cabe ressaltar que através desse mapa, é possível efetuar interpretações sobre a configuração geológica superficial da região.

Outro produto extraído dessa etapa foi o mapa litoestrutural geofísico. Esse produto foi obtido pela composição ternária RGB dos elementos ^{40}K (%), ^{232}Th (ppm) e ^{238}U (ppm) com o *grid* da primeira derivada vertical gerado no processamento de dados de magnetometria. Essa imagem se destaca por conta do detalhe superficial associado aos dados gamaespectrométricos e do detalhamento de anomalias de alta frequência primeira derivada vertical.

4.4 INVERSÃO DOS DADOS DE MAGNETOMETRIA

4.4.1 Inversão do Vetor de Magnetização (MVI)

A inversão dos dados de magnetometria é uma técnica importante para complementar os estudos do comportamento magnético das rochas, no entanto a inversão de dados de magnetometria convencional abrange apenas a susceptibilidade magnética, desconsiderando qualquer outro efeito da natureza da rocha. Além disso, a área de estudo está localizada numa região no qual a influência da magnetização remanescente deve ser considerada (Cordani & Shukowsky, 2009). Por conta disso, a inversão do vetor de magnetização (MVI) foi a técnica de inversão adotada para trabalhar com os dados de magnetometria do Rio de Janeiro.

Introduzida por Ellis, Wet & Macleod (2012), a inversão do vetor de magnetização permite recuperar o vetor de magnetização incluindo a sua direção e magnitude. Nesse sentido, o MVI leva em consideração todos os parâmetros que contribuem para a magnetização dos corpos tais como a susceptibilidade magnética, a magnetização remanescente e a anisotropia. As propriedades magnéticas das rochas são caracterizadas por sua densidade de magnetização (Telford *et al.*, 1990), nesse sentido, admite-se que a inversão do vetor de magnetização seria o mais adequado para se estimar o modelo inverso (Elis *et al.*, 2012). O MVI assume que o campo magnético (equação 6) não diferencia a magnetização remanescente da induzida (equação 7) (Aisengart, 2015).

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_j) = \nabla \int_V \mathbf{M}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3$$

Equação 6: Equação do campo magnético (B) em função do vetor de magnetização (M).

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r$$

Equação 7: A magnetização total de um material é atribuída a magnetização induzida (Mi) somada a magnetização remanescente (Mr).

No entanto, se o volume contendo a magnetização \mathbf{M} for discretizado ao infinitésimo, no qual cada parte passa a apresentar uma magnetização constante \mathbf{m}_k , então:

$$\mathbf{B}_\beta(\mathbf{r}_j) = \sum_{\kappa, \alpha}^{N,3} m_{\kappa, \alpha} \int_{V_\kappa} \partial_\alpha \partial_\beta \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} d\mathbf{r}^3$$

Equação 8: Equação do problema direto da magnetização considerando uma serie de fontes \mathbf{m}_k .

Cabe ressaltar também que a modelagem obtida pela técnica do MVI é definida como susceptibilidade efetiva, incluindo questões anisotrópicas e de remanescência (Aisengart, 2015). A equação 9 exhibe o somatório de fatores para a magnetização M, onde K é a susceptibilidade relacionada ao campo induzido, H é o campo geomagnético, K_r é a susceptibilidade relacionada ao demais fatores contribuintes para a magnetização e K_{MVI} é a susceptibilidade efetiva.

$$\vec{M} = (\vec{k} + \vec{k}_R) \mathbf{H} = \vec{k}_{MVI} \mathbf{H}$$

Equação 9: Magnetização definida em função da susceptibilidade efetiva.

Paralelo a isso, é preciso recordar o princípio básico da teoria da inversão de dados geofísicos: através da solução do problema inverso é possível obter o modelo estimado dos parâmetros físicos por meio dos dados observados, evidentemente assumindo uma margem de erro. A solução do problema inverso linear gera o modelo que satisfaz à equação 10, que por sua vez admite o operador direto (G), parâmetros a serem estimados (m) e o dado observado (d_{obs}) (Williams, 2006). Essa equação é utilizada para simplificar a visualização do problema. No caso do presente estudo, o dado observado equivale ao dado B, ou seja, as medidas do campo magnético anômalo e a magnetização é a incógnita a ser estimada. No entanto, na

natureza, esse tipo de problema é caracterizado como um problema mal posto necessitando, portanto, do procedimento de regularização para permitir a execução da inversão de dados.

$$d_{obs} = Gm$$

Equação 10: Equação do problema direto que precisa ser atendida pela solução do problema inverso.

Tendo em vista essa questão, a técnica do MVI expõe B à regularização de Tikhonov, no qual a diferença entre o dado estimado e o observado é minimizada (Aisengart, 2015). Isso permite o ajuste do modelo ao dado e é estabelecido pela função objetivo (equação 11), que por sua vez opera com o somatório da função modelo (ϕ_M) com a função *misfit* (ϕ_D) e λ (equação 14) é o parâmetro da regularização que pondera as duas funções em termos de χ^2 , um operador estatístico que permite uma análise qualitativa entre o produto obtido e estimado (Sousa, 2018). A função *misfit* (equação 12) traduz o erro associado ao ajuste dos dados e a função modelo (equação 13) associa o modelo obtido com os vínculos fixados no início do problema (Shkromada, 2014). Diante disso, a solução do MVI é a solução do problema de minimização da equação 11. É importante ressaltar que a solução do MVI não é a única solução que ajusta os dados observados.

$$Min \phi(m) = \phi_D(m) + \lambda \phi_M(m)$$

Equação 11

$$\phi_D(m) = \sum_j^M \left| \frac{G_j m - B_j}{e_j} \right|^2$$

Equação 12

$$\phi_D(m) = \sum_{\gamma}^3 |w_{\gamma} \partial_{\gamma} m|^2 + |w_0 m|^2$$

Equação 13

$$\lambda : \phi_D(m) = \chi_T^2$$

Equação 14

O resultado do MVI é um conjunto de vetores associados à magnetização. O tamanho do vetor é proporcional à sua intensidade ou amplitude e a direção é estabelecida pela direção da magnetização. Como esse resultado é denso e a análise qualitativa desse dado é complexa, o MVI pode ser exibido como três *voxels* representando a componente de Amplitude (Ampl), a componente perpendicular (Eperp) e a componente paralela ao campo geomagnético (Eproj). A figura 17 exibe as projeções associadas ao vetor de magnetização. O Eproj está associado à

direção do campo induzido da Terra e, portanto, se assemelha ao resultado da inversão da susceptibilidade magnética, enquanto o E_{perp} apresenta todos os fatores adicionais que contribuem para a magnetização, incluindo a susceptibilidade anisotrópica e a remanescente. A componente da Amplitude é sempre positiva por ser o resultado da soma vetorial das demais componentes e ela é normalizadas de modo a produzir valores de susceptibilidade correspondentes á magnetização total. O resultado obtido do MVI foi analisado a partir do modelo da amplitude do vetor de magnetização. A figura 18 descreve sucintamente o fluxo de trabalho esquemático do MVI.

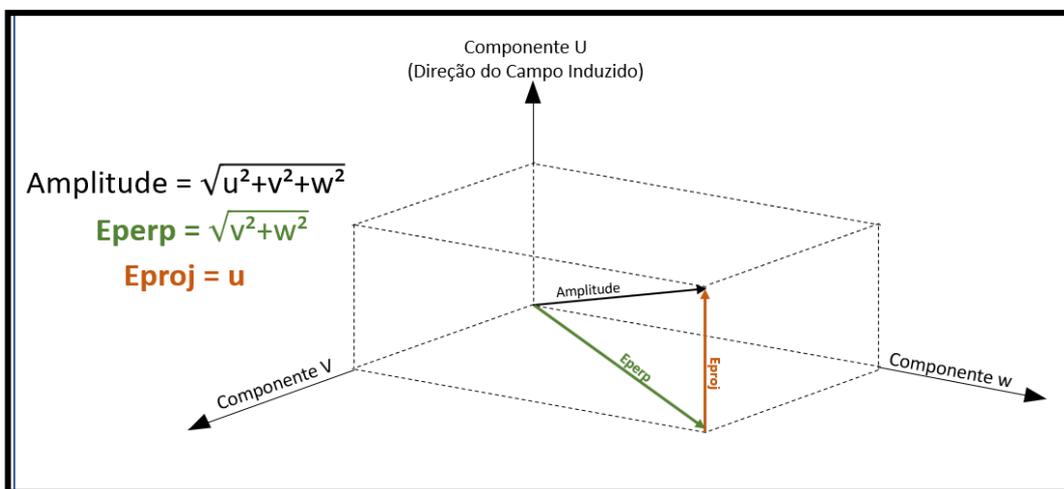


Figura 17: Descrição das projeções associadas ao vetor de magnetização.

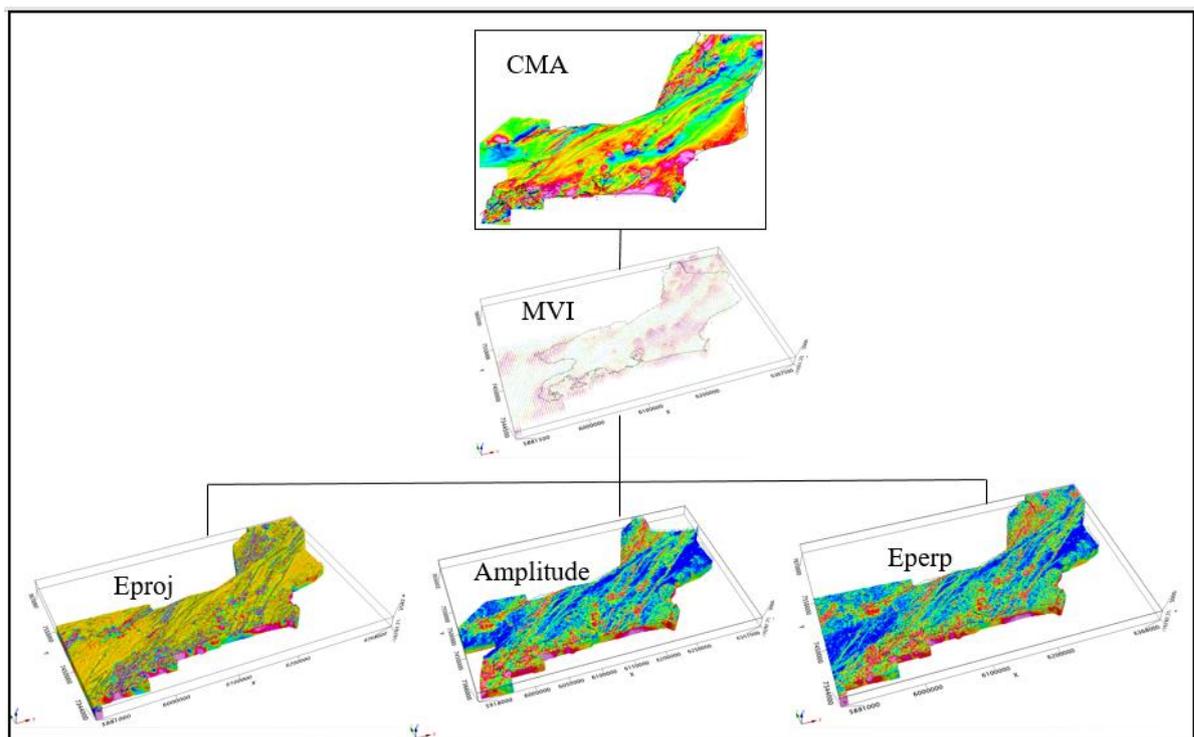


Figura 18: Fluxo de trabalho da inversão do vetor de magnetização.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5. APRESENTAÇÃO

O presente capítulo exhibe os produtos de magnetometria, gamaespectrometria e o resultado obtido pela inversão do vetor de magnetização. Posteriormente são apresentados esses devidos produtos interpretados com a identificação de anomalias e domínios geofísicos. A correlação entre os produtos de geofísica e a geologia do estado do Rio de Janeiro é outro aspecto importante desse capítulo.

Cabe ressaltar que as interpretações realizadas no presente estudo são qualitativas abordando relações de igualdades e desigualdades entre as anomalias e a geologia. Nesse sentido buscou-se integrar dados de magnetometria e gamaespectrometria com as informações geológicas disponíveis. As interpretações geofísicas foram extraídas dos produtos obtidos pelo processamento de dados geofísicos sem nenhum auxílio dos dados geológicos, posteriormente essas informações foram correlacionadas com os dados litológicos e estruturais do mapa geológico da área de estudo. Sabe-se que os resultados de gama estão associados às litologias de superfície, para completar essa descrição soma-se os resultados de magnetometria, que permitem uma análise de anomalias em superfície e subsuperfície

5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS DADOS MAGNETOMETRIA

Ao longo dessa seção estão dispostos os produtos gerados pelo processamento dos dados de magnetometria aérea na forma de mapas temáticos seguidos por uma interpretação das suas principais características. É importante frisar que a interpretação de dados magnetométricos ainda é uma tarefa desafiadora na geofísica, o processamento de dados de magnetometria opera diretamente com sinais de diversos comprimentos de onda originados por múltiplas fontes de distintas geometrias, variadas profundidades, diferentes propriedades do vetor geomagnético e magnetização remanescente.

No caso das anomalias gravimétricas, a estimativa da densidade de uma rocha é o foco de estudo do método gravimétrico. Por outro lado, na magnetometria busca-se entender o comportamento da magnetização das rochas através das variações do campo magnético, ou seja, o quão magnética a rocha é. Essa magnetização, diferente da densidade que é uma grandeza escalar, é um vetor com intensidade e direção. A intensidade de magnetização de uma rocha está associada à quantidade, tamanho, forma e distribuição de minerais ferrimagnéticos,

enquanto a direção da magnetização influencia na forma da anomalia magnética da fonte, o que torna complexo a correlação entre anomalias magnéticas a forma da fonte (Kearey *et al.*, 2009).

Por conta disso e buscando entender a relação entre anomalia-fonte, as técnicas de realce são utilizadas. Essas técnicas permitem destacar anomalias e ressaltar características geofísicas-geológicas importantes tais como, por exemplo, os limites das anomalias magnéticas, identificação de falhas geológicas e entre outros. Nesse sentido, a aplicação de filtros sobre o sinal auxilia a identificação de contrastes físicos das rochas e/ou do meio prospectado, contrastes estes que no sinal original não seriam tão evidentes.

Tendo em vista que a área de estudo se encontra sobre a Faixa Ribeira, que é uma região marcada por intensos processos tectônicos associados ao magmatismo e metamorfismo, os produtos de magnetometria abordados para o presente estudo buscam colaborar para uma análise regional das principais feições magnéticas associadas à complexa evolução tectônica do estado do Rio de Janeiro. Por conta disso, trabalhou-se com os resultados do **campo magnético anômalo, da primeira derivada vertical, da amplitude do sinal analítico, da redução ao pólo, da inclinação do sinal analítico e da diferença da continuação ascendente** sobre a forma de mapas temáticos. A partir dos mapas temáticos magnetométricos foi possível extrair informações sobre as características das principais feições magnéticas e, dessa forma foram definidos domínios magnéticos regionais, lineamentos magnéticos e outras feições que se destacam no estado do Rio de Janeiro. Cabe ressaltar que essa análise dos dados magnetométricos não foi efetuada com suporte de informação geológica. Essa interpretação inicial é essencialmente geofísica e, por conta disso, não deve sofrer influências sobre detalhes litológicos.

O primeiro mapa temático avaliado foi o mapa do campo magnético anômalo (figura 19). Com o CMA foi possível observar as principais características das anomalias magnéticas tais como a forma, a direção e a disposição e, além disso, foi possível definir os domínios magnéticos que compõem a área de estudo. Nesse sentido, a partir do CMA observa-se que as anomalias magnéticas estão dispostas preferencialmente na direção NE-SW e destaca-se também, a presença de anomalias alongadas, lineares e bem definidas nessa mesma direção, essas anomalias podem estar associadas às falhas, diques ou falhas preenchidas por intrusões

Esses domínios foram, em um primeiro momento, diferenciados em função da textura que o CMA apresentava de uma determinada região comparativamente com o restante da área de estudo. Posteriormente, essas áreas foram destacadas e nomeadas como Domínio Magnético

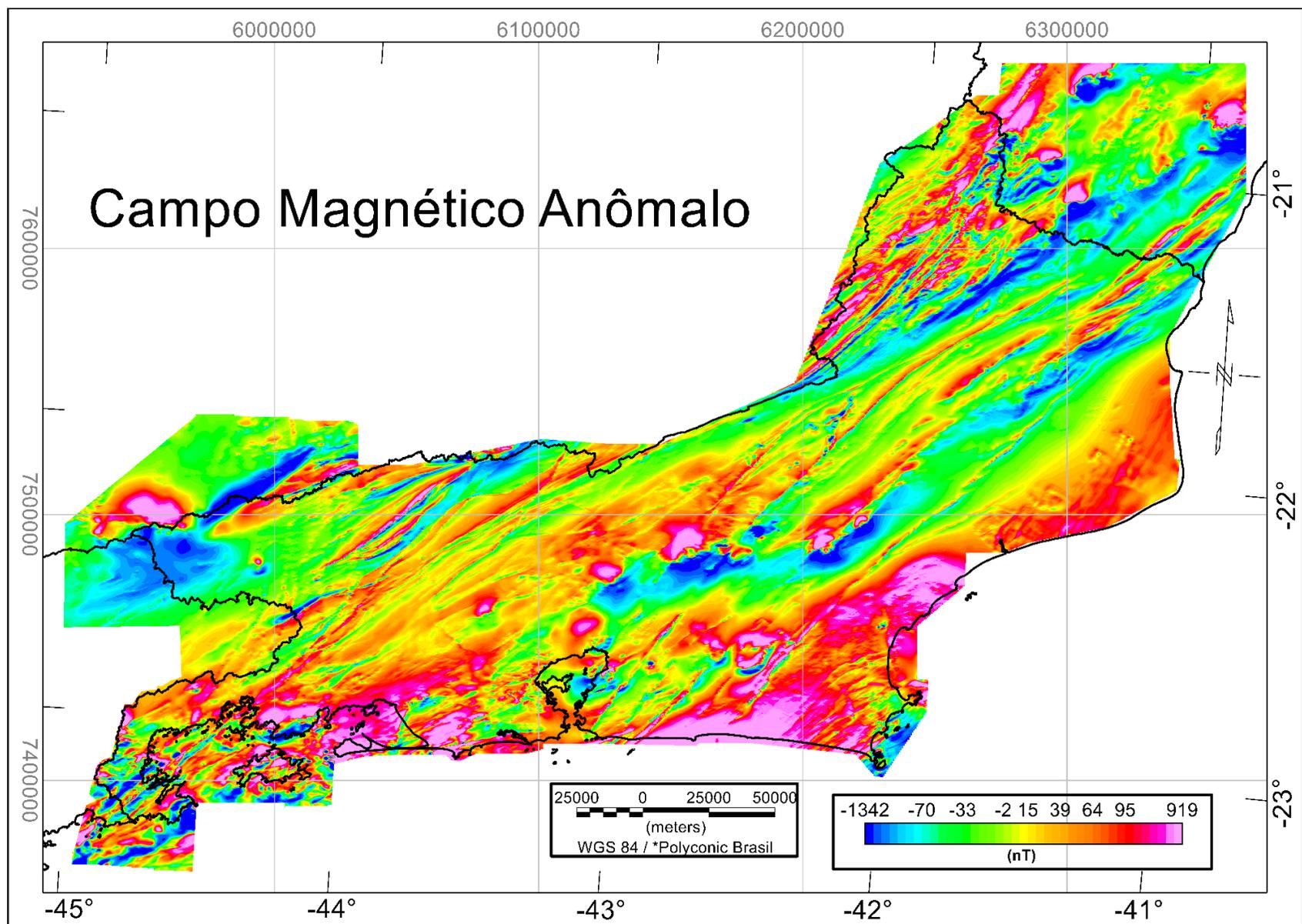


Figura 19 : Mapa do Campo Magnético Anômalo no estado do Rio de Janeiro.

Noroeste, Domínio Magnético Central, Domínio Magnético Paraíba do Sul, Domínio Magnético Cabo Frio e Domínio Magnético Paraty, conforme ilustra a figura 20.

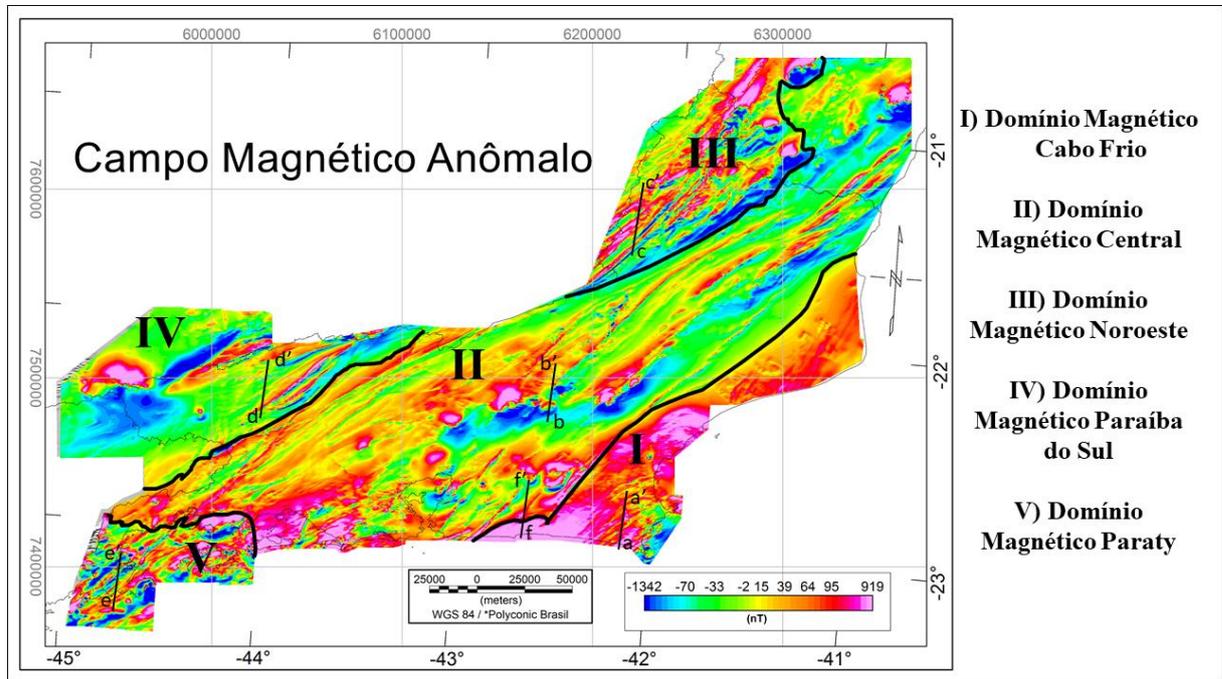


Figura 20: Interpretação dos domínios magnéticos no Estado do Rio de Janeiro a partir do Mapa do Campo Magnético Anômalo.

Outro fator que colaborou com essa classificação foi a comparação entre as assinaturas magnéticas dos respectivos domínios magnéticos, as assinaturas estão diretamente relacionadas com o padrão de anomalias exibidas pelo *grid* do CMA. Observou-se que dentro da região de um domínio magnético as assinaturas magnéticas são similares em intensidade e forma, a figura 21 ilustra assinaturas características de cada domínio magnético definido, a localização dos perfis é evidenciada na figura 20. Em relação às assinaturas magnéticas dos domínios, no Domínio Magnético Cabo frio é possível observar um padrão de anomalia com grande intensidade, presença de picos e variações relativamente suaves entre as assinaturas magnéticas.

Em relação ao Domínio Magnético Central esse padrão de assinatura muda e a intensidades das anomalias magnéticas diminuem, apesar dessa região conter a maior anomalia magnética registrada no RJ. O padrão de assinatura do Domínio Magnético Noroeste se destaca dos demais domínios por se apresentar bastante variado e com a presença de muitas anomalias magnéticas em um mesmo perfil, as assinaturas desse domínio são intensas e se alternam de forma abrupta.

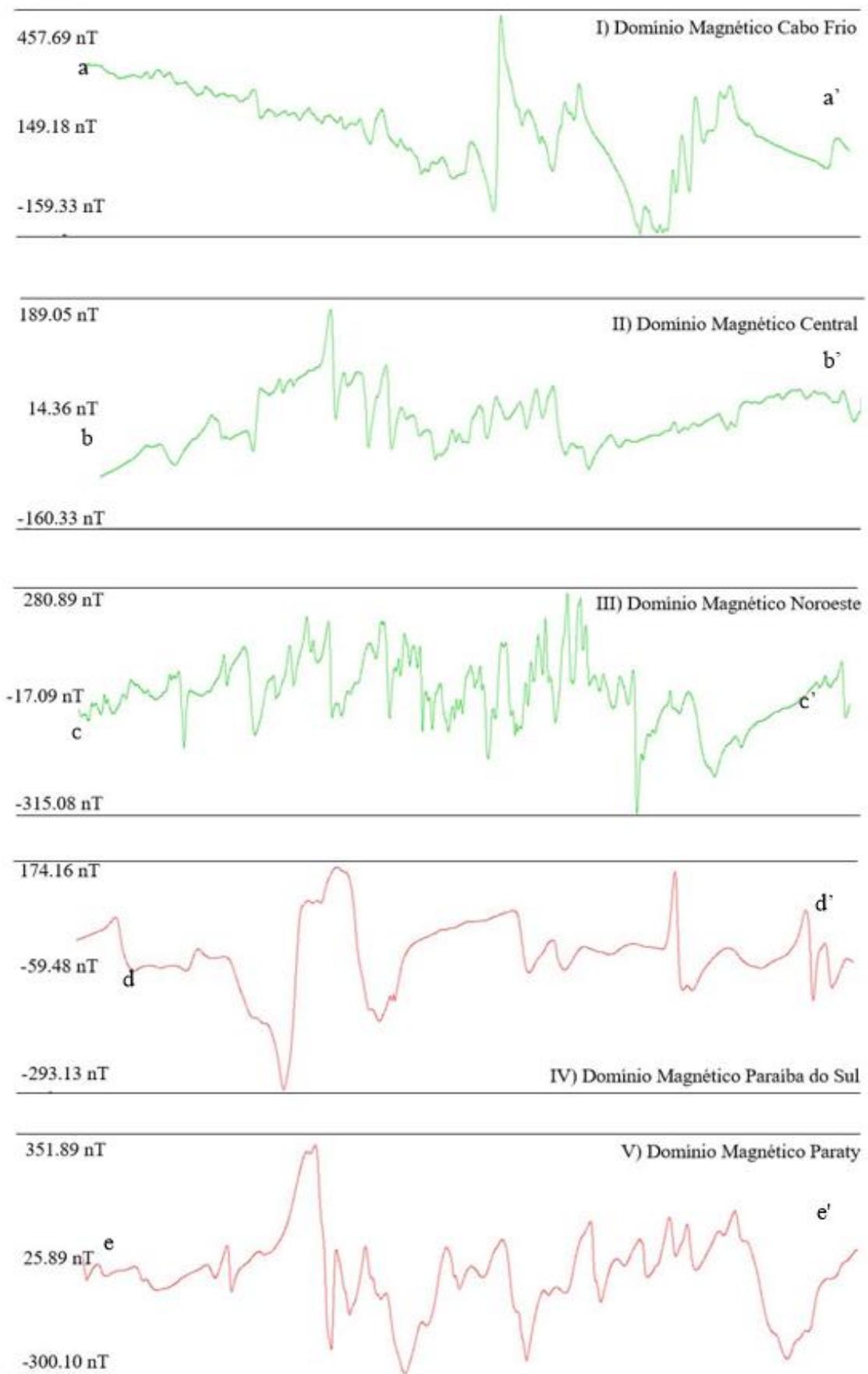


Figura 21: Perfis do CMA dos domínios magnéticos.

O Domínio Paraíba do Sul se apresentou com um padrão mais suave de assinaturas magnéticas e um *background* com baixo magnético mais linear quando comparado aos perfis dos demais domínios magnéticos, além disso, é o domínio que apresenta menores intensidades do campo magnético anômalo.

A partir das assinaturas magnéticas observou-se, também, que nas regiões entre os domínios magnéticos definidos o padrão da assinatura se modificava claramente. Para ilustrar essa questão foi extraído um perfil gerado por uma linha de voo do campo magnético anômalo entre os Domínios Magnéticos Cabo Frio e Central, a localização desse perfil (a-b) é definido na figura 20 e o perfil do campo magnético anômalo é exibido na figura 22, com esse exemplo é possível constatar como o padrão das assinaturas magnéticas se altera entre os domínios magnéticos.

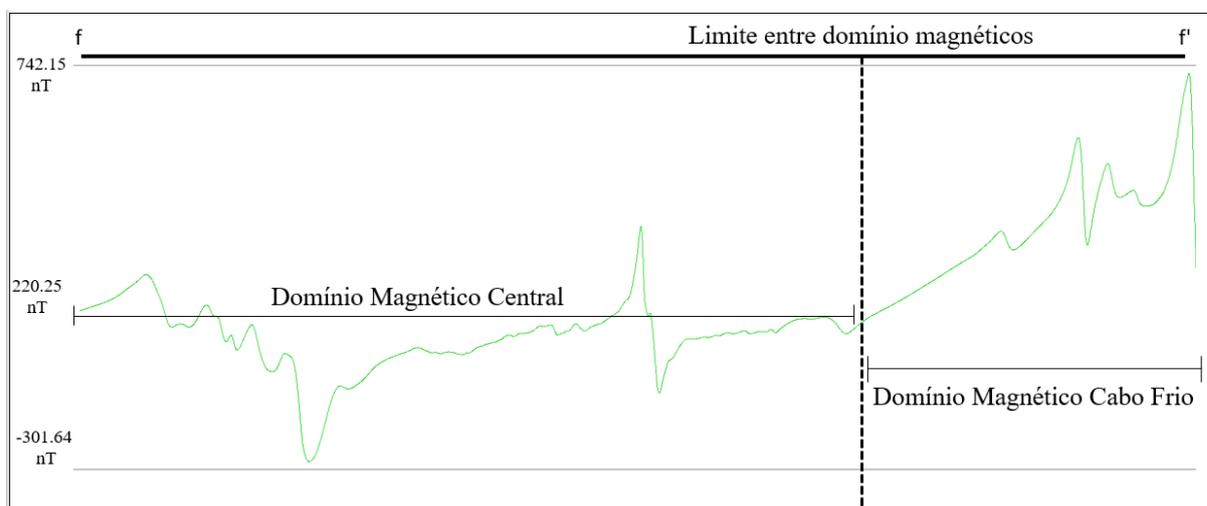


Figura 22: Perfil do Campo Magnético Anômalo entre domínios magnéticos

Além desse padrão de assinatura magnética, as regiões internas de cada domínio apresentam características típicas, que por sua vez também permitiram classificar o CMA em domínios magnéticos. No Domínio Magnético Cabo Frio se destaca como um conjunto mais homogêneo e de grande intensidade magnética, nesse domínio ocorrem feições magnéticas curvilíneas com direções NE-SW e que se alteram levemente para uma feição mais linear na porção norte desse domínio e tende a um menor azimuth. Na porção sudeste desse domínio observa-se a presença de um baixo magnético na direção do Oceano Atlântico e nota-se a presença duas anomalias com uma configuração circular singulares nessa região.

O Domínio Magnético Central se diferencia dos demais domínios por apresentar um *background* de baixo magnético negativo com destaque para as anomalias que ocorrem na

porção central desse domínio. Essas anomalias são intensas, dipolares, apresentam um formato relativamente circular e estão dispostas sobre uma direção preferencial NE-SW.

A maioria dessas anomalias são positivas, contudo algumas se apresentam negativas, ou seja, a porção azul de intensidade negativa está sobre a porção avermelhada de intensidade positiva, essa configuração no Hemisfério Sul caracteriza uma anomalia magnética negativa. Além disso, no extremo sul desse domínio ocorre uma área de grande intensidade do CMA que mais ao norte se diferencia por uma intensidade próxima a zero com cor amarelada, essa feição se apresenta sobre uma grande área do domínio e é possível observar que o seu limite apresenta um *trend* preferencial NE-SW mais linear e que alterna suavemente para um feição curva.

Esse domínio se destaca também pela ocorrência de feições magnéticas lineares bem definidas na mesma direção NE-SW e que na porção ao norte do Domínio Magnético Central tendem mais para o norte. Na parte mais ao leste desse domínio se destaca uma anomalia dipolar positiva por ser a maior anomalia magnética que ocorre em todo o estado do Rio de Janeiro. Observa-se também que, diferente do Domínio Magnético Cabo Frio, o Domínio Magnético Central apresenta um padrão de intensidade magnética menos homogêneo, mas que claramente se manter distinto dos demais domínios magnéticos, o que contribuiu para identificação e classificação desse domínio magnético.

O mesmo ocorreu com o Domínio Magnético Noroeste, na sua porção interna é evidente que as anomalias magnéticas se diferenciam bastante do restante do estado do RJ. Essas anomalias são mais são mais alongadas e se assemelham a um lineamento magnético, mas algumas dessas anomalias se curvam suavemente na extremidade do domínio apresentando um caráter sinuoso com dobras, que podem estar associadas às dobras geológicas. Contudo a porção centro-norte desse domínio é uma área densa de informação, o que dificulta a identificação de um padrão de anomalias. O que se observa é que nesse domínio ocorrem muitas anomalias magnéticas e de alta intensidade. Em relação ao Domínio Magnético Paraíba do Sul se destaca a ocorrência de duas anomalias magnéticas grandes, em termos de extensão, sobre um baixo magnético negativo do *background*. Contudo, a anomalia mais ao norte é uma anomalia magnética negativa. Além disso, se destaca também a ocorrência de anomalias magnéticas mais curvas com direção NE-SW e a presença de uma anomalia dipolar e bem definida nesse domínio. O Domínio Magnético Paraty, assim como o Domínio Magnético Noroeste, se mantém bem heterogêneo dos demais domínios magnéticos que compõem o RJ. Nesse domínio ocorrem anomalias magnéticas intensas e grandes variações de anomalias, é possível identificar uma leve tendência NE-SW de lineamentos magnéticos mais curvilíneos.

Analisando integralmente o CMA do estado do Rio de Janeiro há anomalias relativamente circulares, dipolares e intensas, principalmente nas regiões dos Domínio Magnético Central, Paraíba do Sul e Paraty. No Domínio Magnético Cabo Frio há duas anomalias desse tipo.

Seguindo o fluxo de trabalho proposto pela metodologia, o próximo produto abordado foi o mapa da primeira derivada vertical (Figura 23). A partir da DZ foi possível identificar anomalias mais superficiais relacionadas aos curtos comprimento de ondas. A primeira característica observada pelo mapa da derivada vertical foi a presença de feições lineares, os lineamentos magnéticos, que apresentam uma tendência NE-SW. Contudo, na porção mais ao leste do RJ nota-se uma leve redução do azimute do lineamento para NS. Destaca-se também a presença de feições sinuosas bem definidas no RJ preservando tendências NE-SW, que podem estar associadas à dobramentos geológicos. Através do mapa da derivada vertical também se observou em detalhes a existência de anomalias sobrepostas, principalmente nos Domínio Magnético Paraty e Central.

Assim como no CMA, a partir da derivada vertical se constatou a presença de anomalias circulares, porém com a DZ essas anomalias se tornam mais evidentes e pontuais, o que indica que as fontes dessas anomalias também estão dispostas na porção mais superior da área de estudo. Destacam-se as anomalias circulares do Domínio Magnético Central. Nota-se que a maioria dessas anomalias circulares aparecem próximas de um lineamento magnético.

Outra característica que na derivada vertical ficou mais evidente é a diferenciação entre os domínios magnéticos, as texturas diferenciadas em cada domínio ressaltam que se tratam de áreas singulares e distintas do restante do dado. É importante ressaltar que essa diferenciação é essencialmente superficial, tendo em vista que a derivada vertical resalta características de alta frequência e de baixo comprimento de onda associados à porção mais superior do estado do RJ. Nesse aspecto, observou-se que o Domínio Magnético Cabo Frio se destacou claramente dos demais domínios magnéticos na DZ, nessa região se observa uma grande concentração de lineamentos magnéticos na porção mais sudeste do domínio, que diminui em direção ao continente.

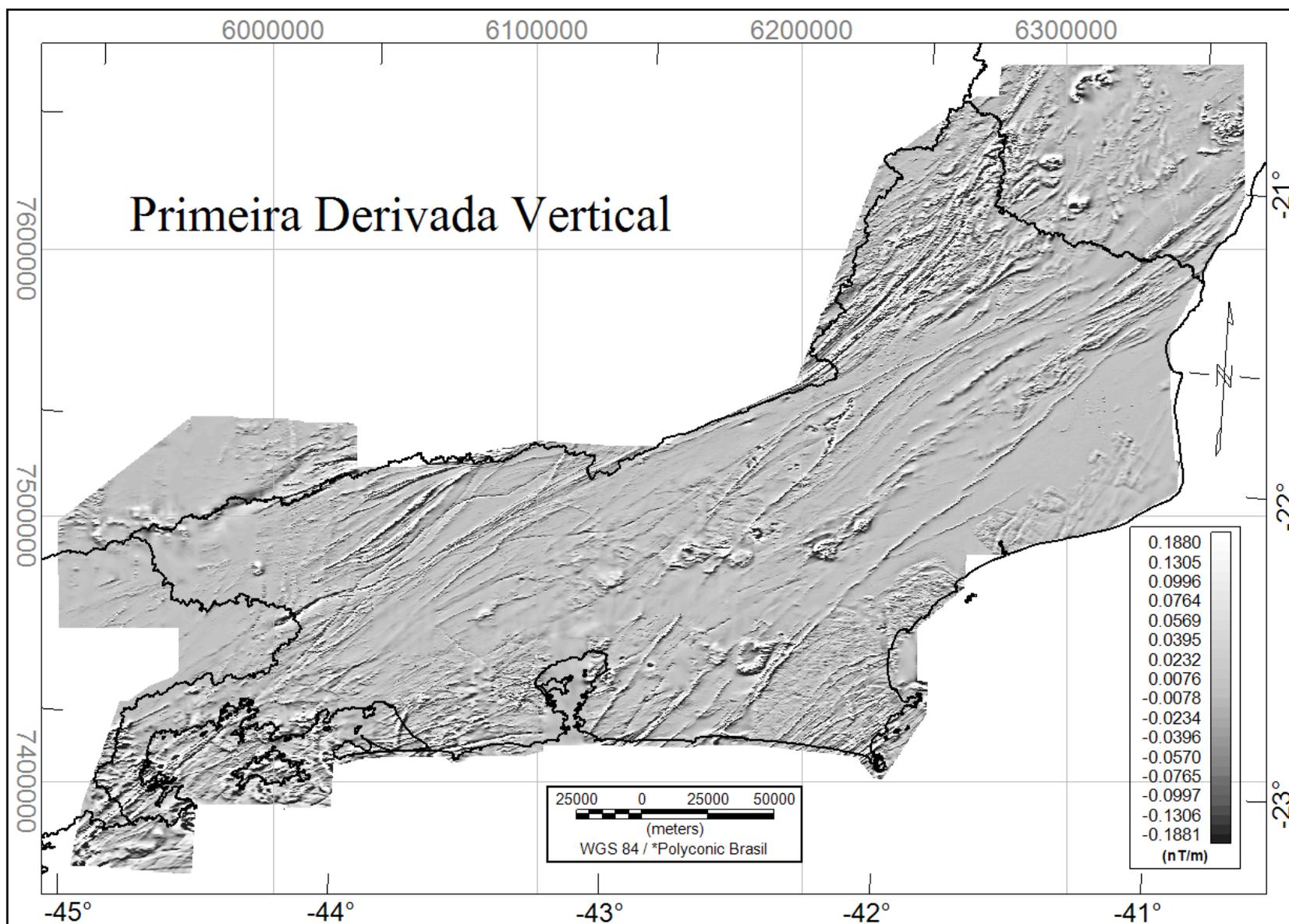


Figura 23: Mapa da Primeira Derivada Vertical no estado do Rio de Janeiro.

Na DZ é evidente que o Domínio Magnético Cabo Frio apresenta uma textura mais rugosa e com isso pode ser diferenciado, mais superficialmente, do Domínio Magnético Central. Em relação do Domínio Magnético Central se observa lineamentos magnéticos bem definidos na direção NE-SW. Essas feições são relativamente mais extensas e se alongam do litoral do RJ até o Espírito Santo, elas são bem evidentes na porção centro-leste desse domínio. Mais a Oeste os lineamentos se concentram no limite do domínio, se apresentam menos extensos e colaboram para diferenciação entre o Domínio Magnético Central e o Domínio Magnético Paraíba do Sul.

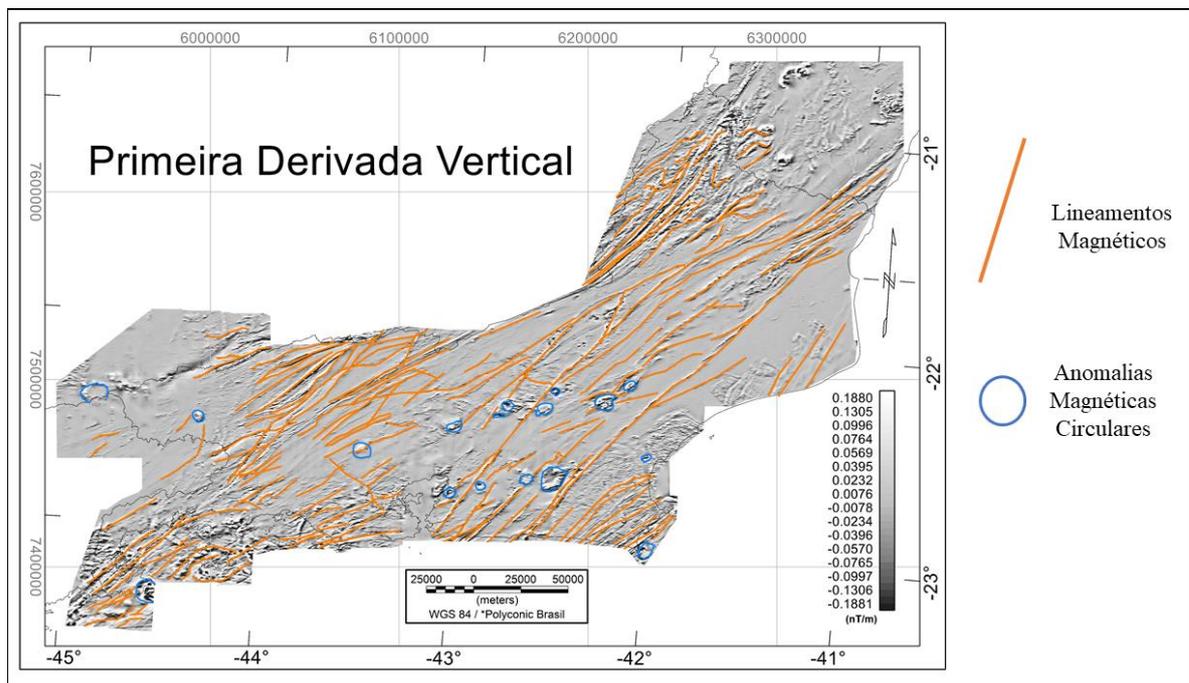


Figura 24: Mapa da Primeira Derivada Vertical interpretado.

No Domínio Magnético Paraíba do Sul feições magnéticas mais curvas se destacam, enquanto no Domínio Magnético Noroeste ressalta-se a grande concentração dessas feições. No Domínio Magnético Noroeste feições levemente sinuosas nas extremidades dos lineamentos magnéticos são os destaques, nesse domínio se observa a presença de algumas anomalias circulares, como nos demais domínios magnéticos. Enquanto no Domínio Magnético Paraty é possível observar a ocorrência de muitos lineamentos magnéticos com tendência NE-SW.

O terceiro mapa avaliado foi o mapa da amplitude do sinal analítico (figura 25). Com o resultado do ASA se confirmou a presença de lineamentos magnéticos com tendência NE-SW e corpos circulares. Contudo, com o ASA algumas dessas anomalias magnéticas circulares se mostraram mais intensas nas bordas e com um baixo sinal nos seus centros.

Outra característica marcada com o ASA foi a diferenciação dos Domínio Magnético Noroeste, como já havia sido observado nos mapas temáticos anteriores, nessa região nota-se a ocorrência de diversas fontes com anomalias intensas e que se diferenciam do restante da área de estudo. Além disso, somente com o ASA foi possível identificar a ocorrência de anomalias circulares nessa região.

Na região sudeste do Estado do Rio de Janeiro, na porção oriental do Domínio Magnético Cabo Frio, o ASA exhibe feições magnéticas lineares mais sinuosas. Esses lineamentos se iniciam no sul da área com uma direção NE-SW e se desenvolvem para leste em direção ao oceano.

Nota-se com o sinal analítico anomalias bem definidas na região do Domínio Paraíba do Sul incluindo uma tendência sinuosa e anomalias lineares, que separam esse domínio do Domínio Magnético Central. No ASA se observa também que a região do Domínio Magnético Paraty apresenta intensas anomalias magnéticas se assemelham com a região adjacente do Domínio Magnético central, essa região foi, especificamente com o ASA, agrupada. Essa região pode estar associada à diversas fontes magnéticas, assim como ocorre no Domínio Magnético Noroeste.

Através do mapa da amplitude do sinal analítico também se constatou que existem anomalias sobrepostas na região de estudo, no Domínio Magnético Central há lineamentos sobrepostos a outros lineamentos, o mesmo ocorre no Domínio Magnético Paraty, o ASA evidenciou essa característica. Essa identificação está relacionada à ocorrência de fontes magnéticas sobrepostas em profundidade. Para uma análise mais regional do ASA nota-se que as anomalias magnéticas foram ressaltadas e seu *background* foi suavizado. Essa questão colabora para uma melhor caracterização das regiões anômalas do RJ e identificação dos padrões de anomalias na região.

Apesar disso, a amplitude do sinal analítico transformou os conteúdos locais em anomalias positivas agrupando feições, análises mais detalhadas do RJ são prejudicadas por essa característica do ASA. Um exemplo é a anomalia circular que ocorre na região sudoeste do estado, a feição identificada no ASA apresenta duas anomalias circulares com mesma intensidade, quando na verdade se trata de um único corpo com caráter dipolar.

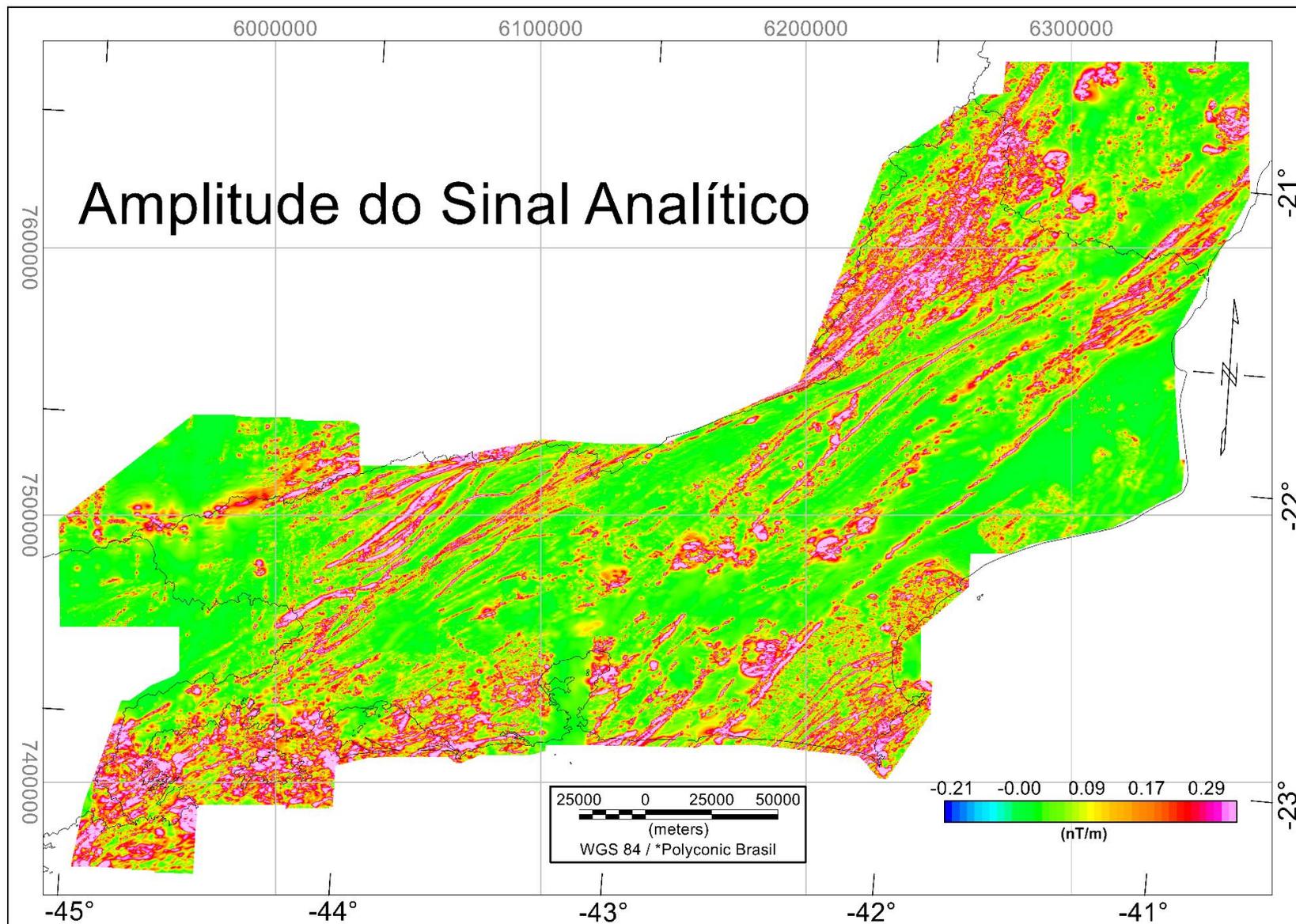


Figura 25: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico no estado do Rio de Janeiro.

De uma maneira geral, o resultado do ASA colaborou com a melhor definição de alguns domínios magnéticos, no entanto é possível constatar que esse produto agrupou anomalias dificultando a identificação das mesmas separadamente, esse problema é evidente dentro dos domínios magnéticos. Essa questão pode estar associada ao fato do método do sinal analítico centralizar, em teoria, as anomalias magnéticas. A figura 26 exibe as principais características observadas no ASA como, por exemplo, os lineamentos.

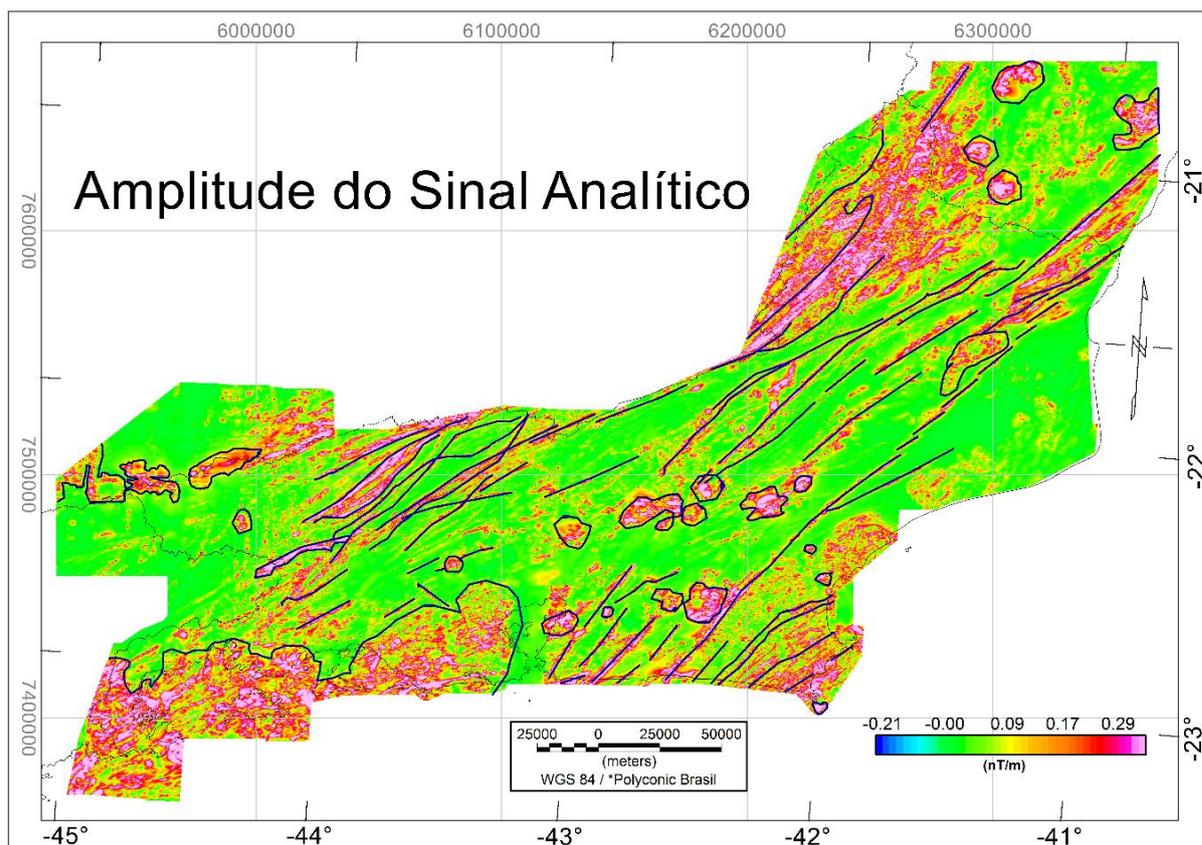


Figura 26: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico interpretado.

Posterior ao mapa da amplitude do sinal analítico, o mapa da redução ao pólo foi abordado, figura 27. A RTP apresentou algumas características que reforçam a interpretação dos dados geofísicos. Os lineamentos magnéticos regionais com direção NE-SW, as anomalias circulares e os domínios magnéticos, assim como no CMA, também foram bem definidos com a redução ao pólo. Nota-se também que a RTP centralizou a maioria das anomalias, o que pode colaborar com a caracterização geológica, um exemplo disso a grande anomalia magnética que ocorre na porção sul do Domínio Magnético Paraíba do Sul. Além disso, na RTP é possível identificar com clareza anomalias circulares com alta intensidade nos seus extremos e um baixo magnético no centro.

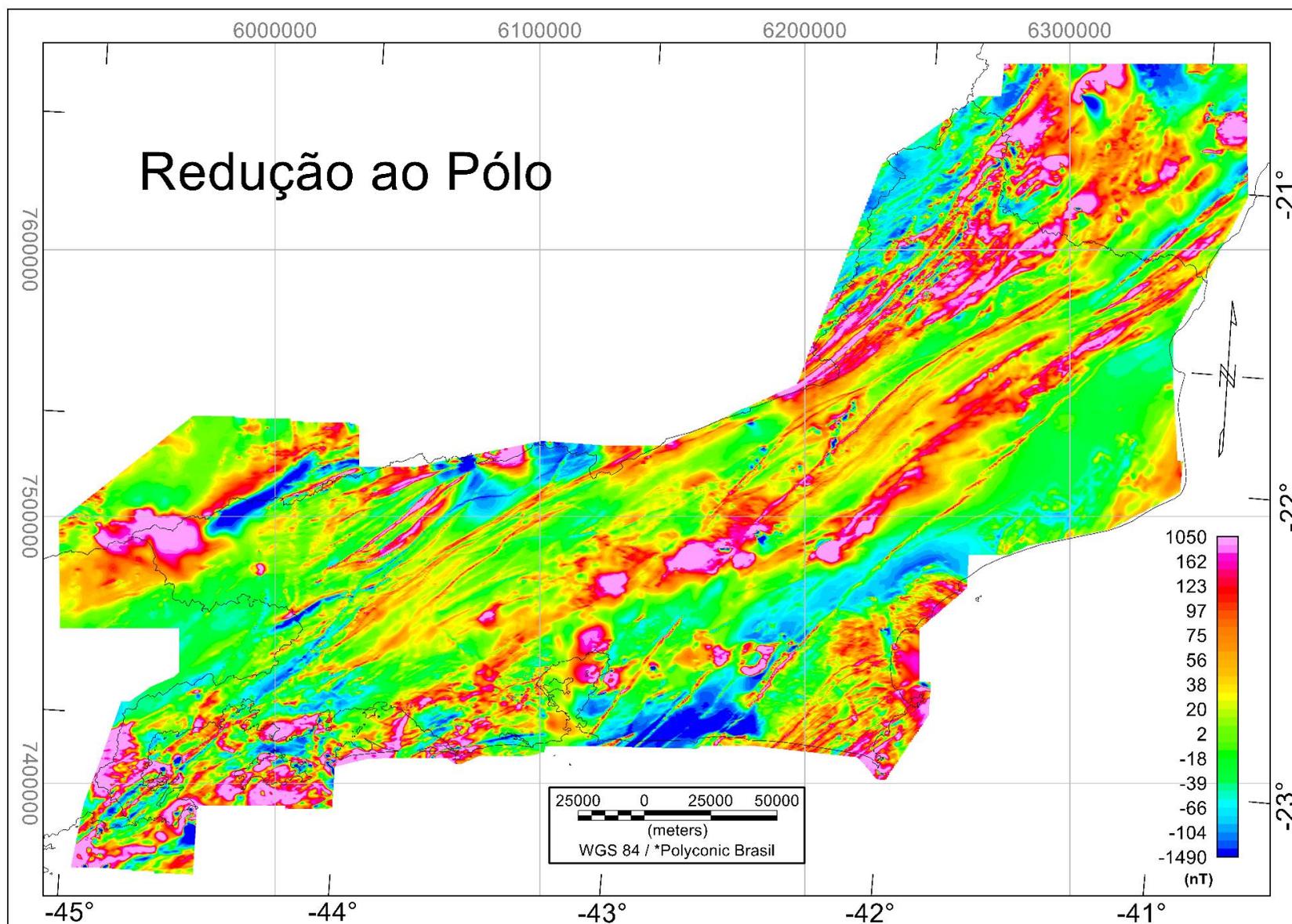


Figura 27: Mapa da Redução ao Pólo no estado do Rio de Janeiro.

Através do mapa da redução ao pólo se observa que o padrão de anomalias magnéticas se repete dentro do mesmo domínio magnético e se diferencia das regiões adjacentes. Com a RTP pôde-se melhor caracterizar as anomalias magnéticas do Domínio Magnético Paraty, nota-se uma região com grande intensidade do campo magnético na porção interna do Domínio Magnético Central assumindo uma direção de disposição NE-SW e percebe-se com clareza que a porção mais ao noroeste do RJ se destaca de toda região de estudo.

Por outro lado, a RTP apresenta determinadas características que não são condizentes com a sua teoria e tampouco com o que se tem observado dos demais mapas temáticos. A permanência de anomalias dipolares ao longo da área de estudo é um problema que ocorre no mapa de redução ao pólo. É importante ressaltar que essas anomalias que não foram centralizadas apresentam similaridades entre si: são anomalias magnética negativas. É evidente que através desse produto não foi possível centralizar a anomalia magnética sobre a fonte causadora, nesses casos. A figura 27 exibe o mapa da redução ao pólo interpretado.

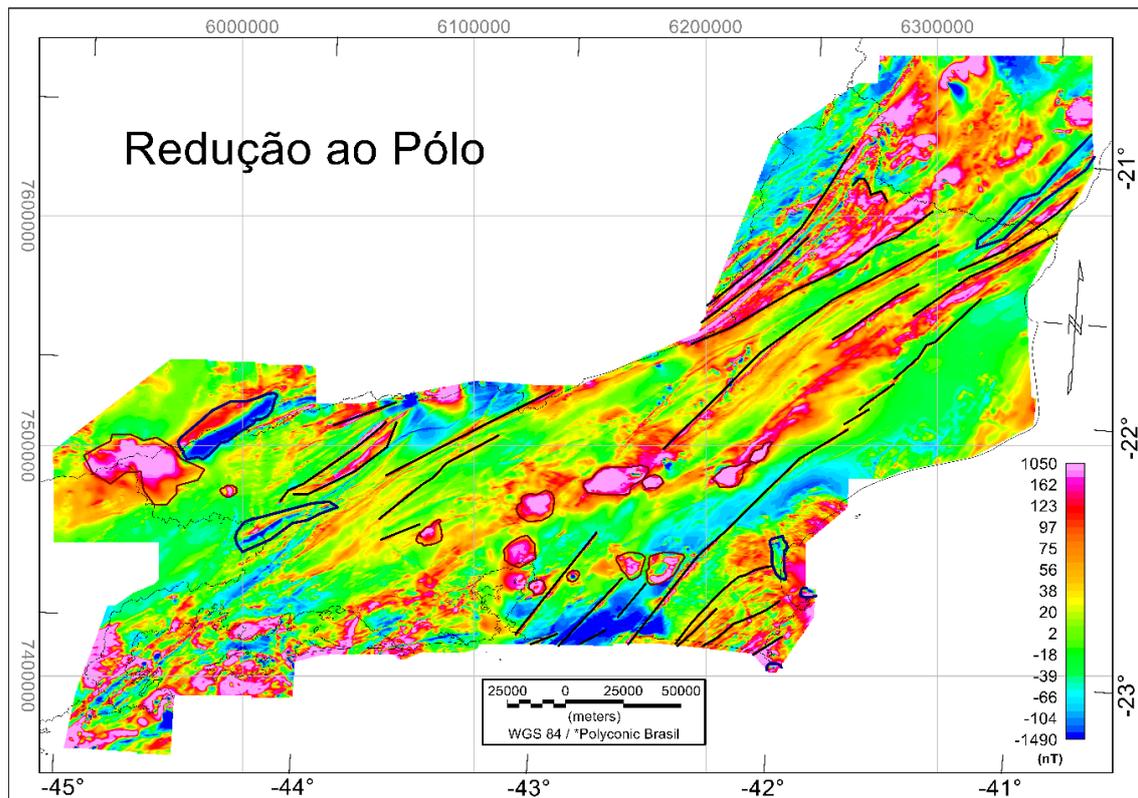


Figura 28: Mapa da Redução ao Pólo interpretado com as principais características ressaltadas.

Outro problema evidenciado na RTP, quando comparado com o mapa do CMA, são as regiões do Domínio Magnético Cabo Frio e Noroeste. No primeiro domínio a área indicada pelo CMA como intensa é apontada na RTP como um baixo do campo magnético e, além disso,

na RTP o Domínio Magnético Cabo Frio é exibido sobre uma área mais restrita. Nota-se que a ocorrência da anomalia circular nesse domínio não é claramente definida e é exibida na RTP sobre uma área de baixo magnético. Nos demais mapas temáticos é evidente que essa anomalia é singular na região, o que na RTP não se destaca. Na região mais intensas exibida pela RTP do Domínio Magnético Noroeste nota-se um resultado bastante intenso e homogêneo que dificulta a identificação de um padrão de anomalias como, por exemplo, os lineamentos magnéticos especificamente desse domínio.

De uma maneira geral, apesar da RTP exibir limitações ela pode ser considerada um produto paralelo para identificação de anomalias e, dessa forma, pode colaborar com as correlações com a geologia. Além disso, os problemas evidenciados na RTP como, por exemplo, a presença de anomalias dipolares, ressaltam quais áreas precisam ser abordadas com mais cautela. Por conta disso, o presente estudo considera as interpretações geofísicas extraídas da RTP fundamentais.

O quinto mapa avaliado foi o mapa da inclinação do sinal analítico (figura 28). Apesar de ser um mapa denso de informação é possível avaliar questões estruturais com esse produto. Através do mapa da inclinação do sinal analítico nota-se primeiramente uma direção preferencial NE-SW da disposição das anomalias magnéticas, principalmente, lineamentos magnéticos. Além disso, na *tilt* a definição dos domínios magnéticos Cabo Frio e Noroeste se mantém evidente, o padrão de textura desses domínios apresenta um aspecto diferenciado das demais regiões do estado do RJ. No Domínio Magnético Noroeste se observa a presença de lineamentos magnéticos bem definidos com sinuosidades na sua porção mais ao norte, com a *tilt* é evidente que essa porção apresenta feições que remetem a dobras geológicas. Enquanto no Domínio Magnético Central nota-se um intenso relevo magnético com uma leve tendência NE-SW distribuído na sua porção centro-norte, além disso, é evidente a presença de feições magnéticas lineares com alternância suave da direção preferencial. Em relação ao Domínio Magnético Paraíba do Sul se ressaltam as feições sinuosas.

Contudo, algumas áreas apresentam um aspecto complexo para interpretação interna, principalmente nas regiões onde foram efetuadas as extrapolações, por conta disso não foi possível extrair informações qualitativas dessas regiões. A única exceção é o caso da anomalia magnética na porção mais oriental do Domínio Magnético Paraíba do Sul, essa anomalia se

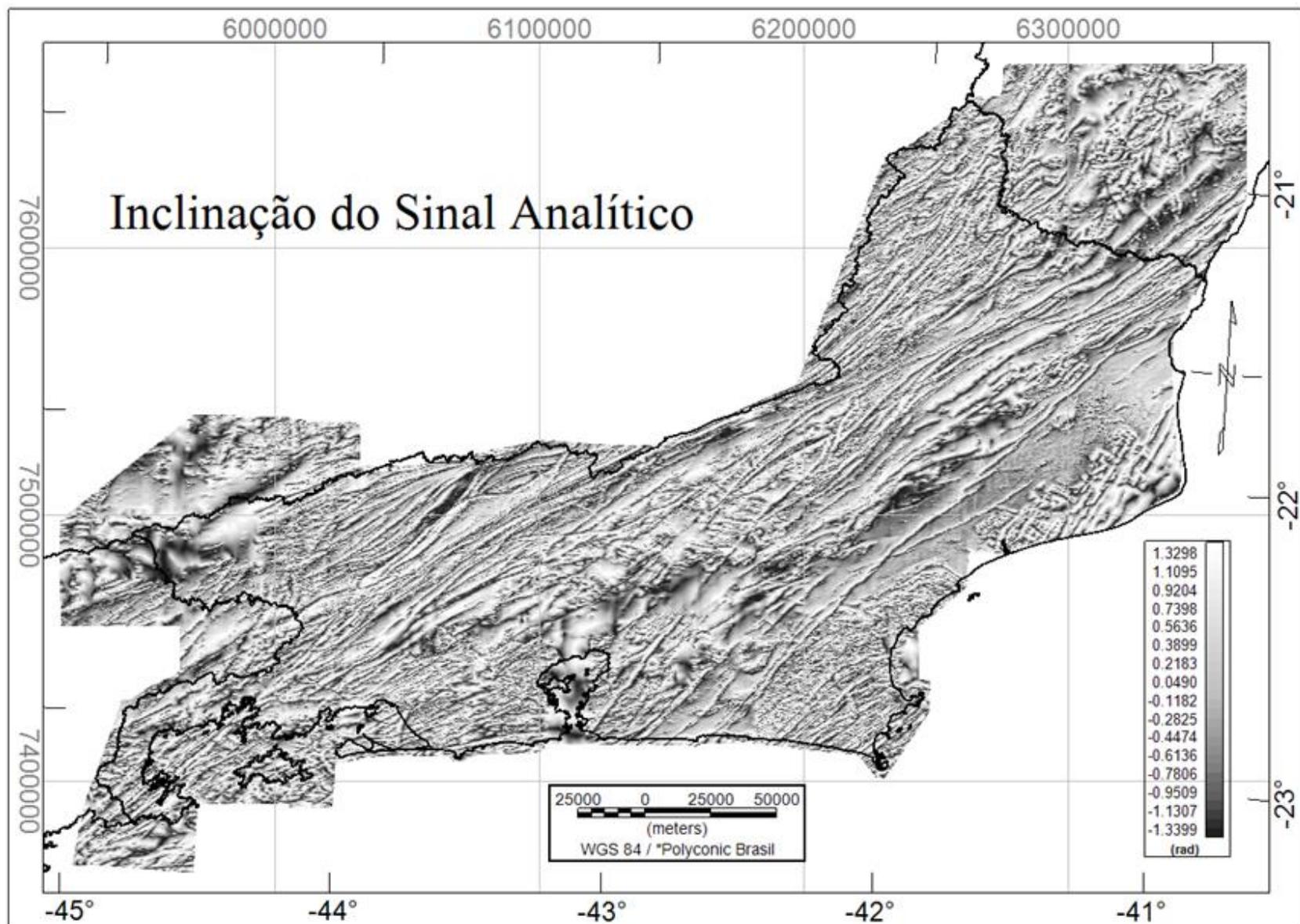


Figura 29: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico no estado do Rio de Janeiro.

apresenta bastante intensa, homogênea com uma grande extensão espacial e pode ser destacada claramente do restante do conjunto. Vale lembrar que a extrapolação foi utilizada para complementar áreas vazias de amostragem. Sobre uma perspectiva regional, o mapa da inclinação do sinal analítico exhibe com clareza feições estruturais e suas respectivas direções, principalmente nas regiões dos domínios magnéticos intensos como o Noroeste e Paraty. Nesse sentido, a inclinação do sinal analítico colaborou com as interpretações geofísicas-geológicas do estado do Rio de Janeiro, a figura 30 exhibe a *tilt* interpretada com as suas principais características ressaltadas.

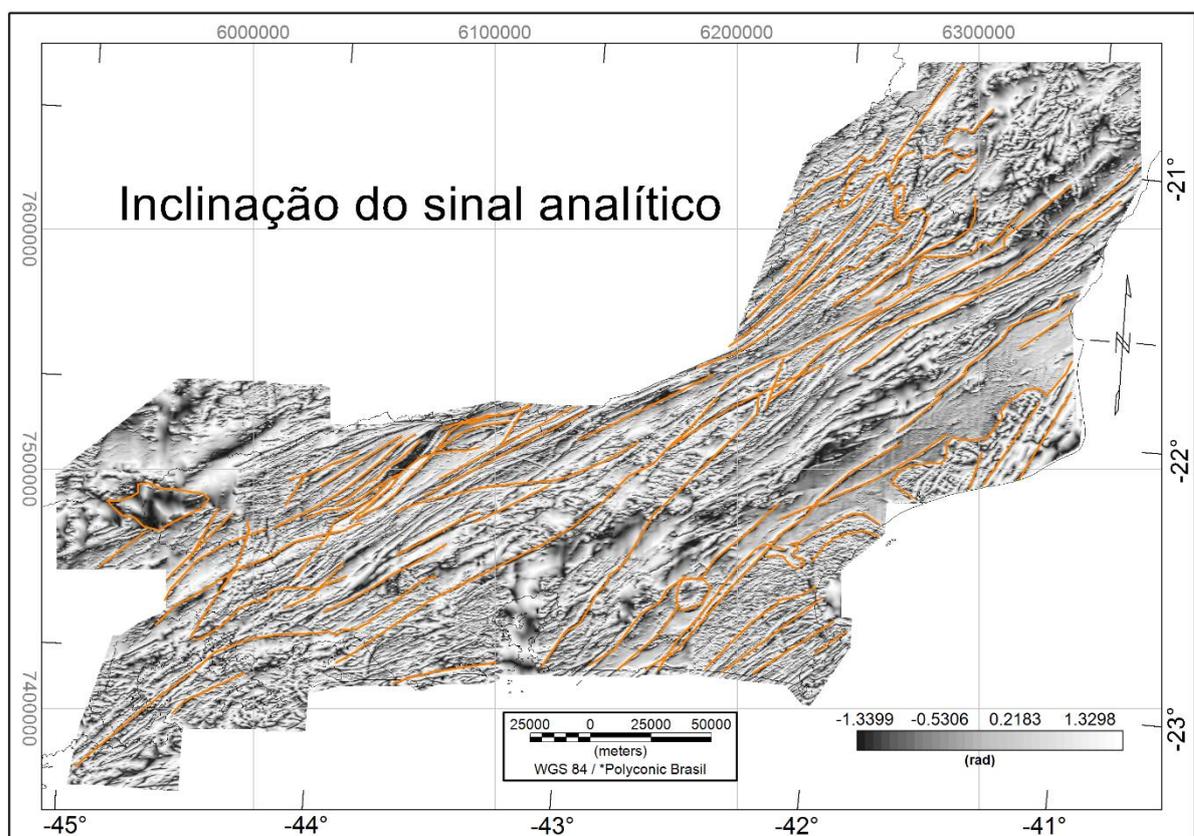


Figura 30: Mapa da inclinação do sinal analítico com as principais características ressaltadas.

O último mapa temático da magnetometria abordado foi o mapa da continuação ascendente (figura 31), no qual a definição dos lineamentos magnéticos e dos domínios se mantem coerentes com os demais mapas temáticos. Através desse mapa é possível identificar que os lineamentos magnéticos estão dispostos sobre a direção NE-SW com uma inclinação do seu azimuth, porém na mesma direção. Essa configuração é evidente no Domínio Magnético Central. Se confirmaram também anomalias sobrepostas, anomalias circulares no Domínio Magnético Central e Paraíba do Sul.

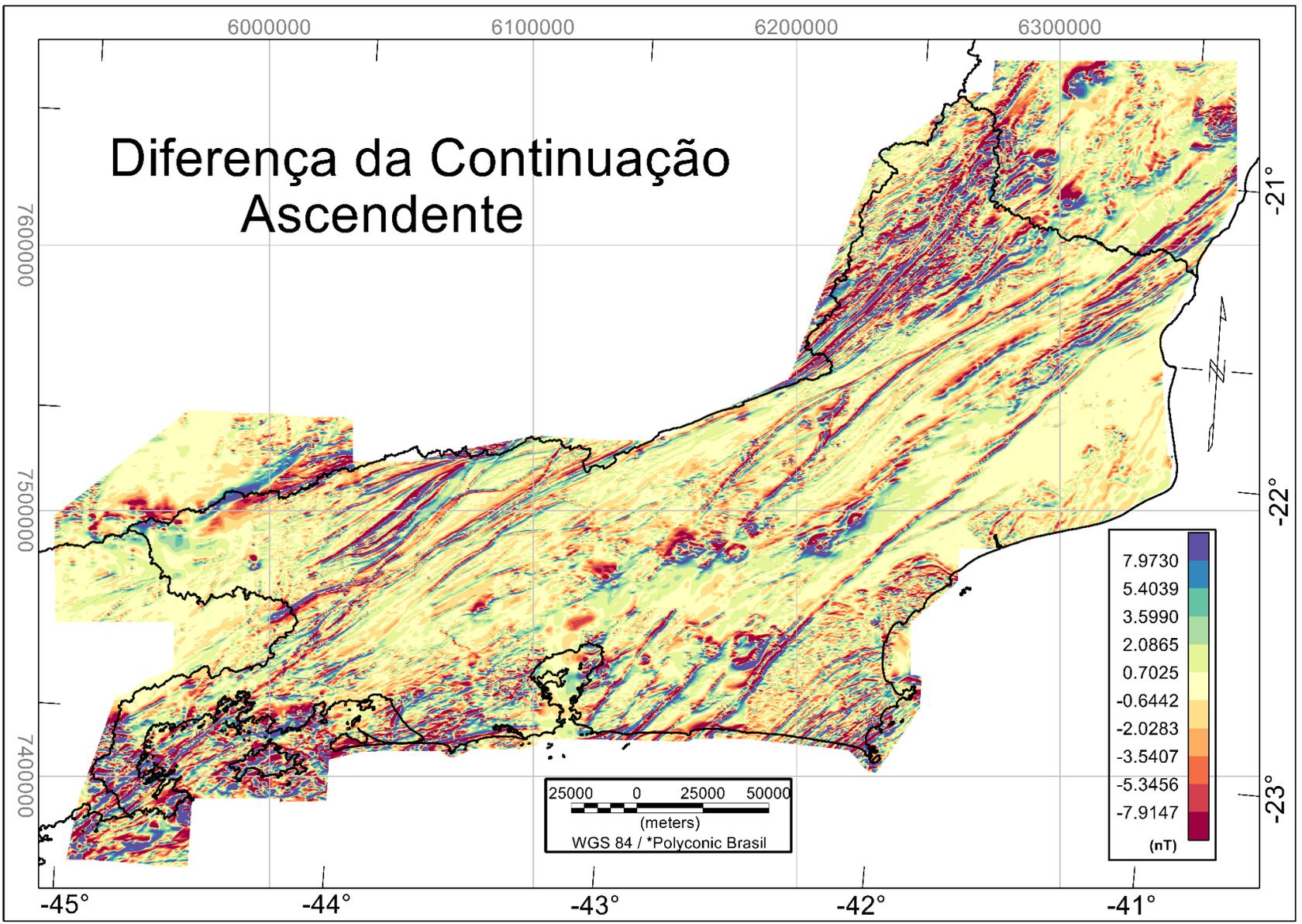


Figura 31: Mapa da Diferença da Continuação Ascendente no estado do Rio de Janeiro.

Em relação ao Domínio Magnético Paraty, a diferença da continuação ascendente revela lineamentos magnético com direção NE-SW que não eram evidentes no CMA, o mesmo ocorre na região noroeste do RJ. A figura 32 exibe o mapa da continuação ascendente interpretado. Através desse produto as anomalias magnéticas de grande intensidade são ressaltadas em detrimento do *background* da região de estudo.

A metodologia da diferença da continuação ascendente permite destacar anomalias que possuem fontes não tão superficiais, dessa forma, pode-se concluir que as anomalias evidenciadas com essa transformação não estão associadas às fontes superficiais colaborando com o estudo da geologia estrutural da região.

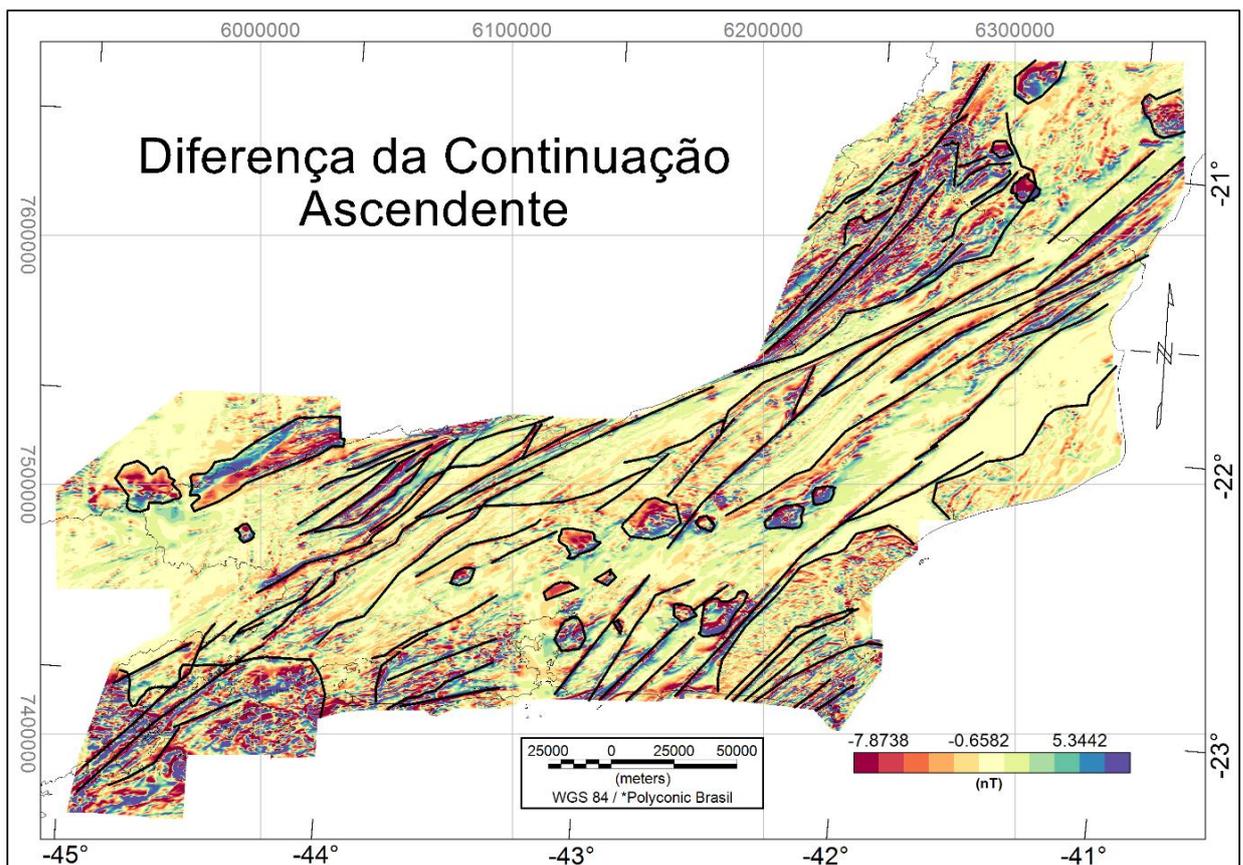


Figura 32: Mapa da diferença da Continuação Ascendente interpretado.

Sobre uma perspectiva geral dos mapas temáticos de magnetometria algumas características se destacam em todos os produtos, essas características são: os lineamentos magnéticos com *trend* NE-SW, feições com uma geometria quase circular concentradas majoritariamente na porção central do estado e a identificação de domínios magnéticos.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Nesta seção encontram-se os produtos gerados pelo processamento dos dados de gamaespectrometria aérea e as discussões envolvidas acerca dos mapas temáticos obtidos pelo processamento de dados gamaespectrométricos. Conforme a metodologia descrita no capítulo anterior e atendendo um dos objetivos do presente estudo, os mapas temáticos gerados pelo processamento de dados são: Potássio anômalo percentual, Tório anômalo em partes por milhão e Urânio Anômalo em partes por milhão, a composição ternária de ^{40}K (%), ^{232}Th (ppm) e ^{238}U (ppm) e o mapa litoestrutural geofísico. Tendo em vista que o processamento de dados de gamaespectrometria abrangeu toda área de integração dos projetos 1105, 1117 e 1093, que é uma área superior à área de interesse, os *grids* das concentrações de ^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U foram recortados para exibir somente o RJ.

Cabe ressaltar que os dados gamaespectrométrico estão diretamente associados às litologias de superfícies e tende a exibir um sinal proveniente de uma fonte localizada a uma profundidade restrita a centímetros. Dessa forma, as interpretações geofísicas extraídas dos mapas temáticos gamaespectrométricos não abrangem anomalias de subsuperfície, mas podem contribuir com maior entendimento e identificação de litologias de superfície da área de estudo. De forma análoga ao procedimento aplicado aos dados magnetométricos, as interpretações extraídas dos resultados gamaespectrométricos são qualitativas de caráter regional e foram estabelecidas de acordo com padrões de semelhanças e desigualdades com as anomalias das regiões adjacentes.

O primeiro mapa temático de gamaespectrometria obtido foi o mapa da concentração de Potássio anômalo percentual (^{40}K) no estado do Rio de Janeiro, figura 33. A primeira característica observada nele são as anomalias mais intensas de potássio com coloração rosa e vermelho. Essas anomalias se apresentam em toda área de estudo, mas se concentram principalmente na parte mais Centro-Sul do RJ. Nota-se também uma faixa dessa anomalia na parte central e ao Norte do estado. Nessa mesma região é possível identificar uma distribuição com direção preferencial da anomalia, especificamente a direção NW-SW.

Além disso, ao longo desse resultado é possível identificar a presença de anomalias circulares, a maioria se apresenta com alta intensidade do potássio distribuído sobre toda circunferência e algumas outras se revelam com alta concentração nas extremidades. Em contraste, o restante da área de estudo apresenta um *background* baixo desse tipo de anomalias se aproximando a zero. As regiões em azul marcam áreas com a presença de água como, por exemplo, as lagoas e nessas localidades não há sinal gamaespectrométrico.

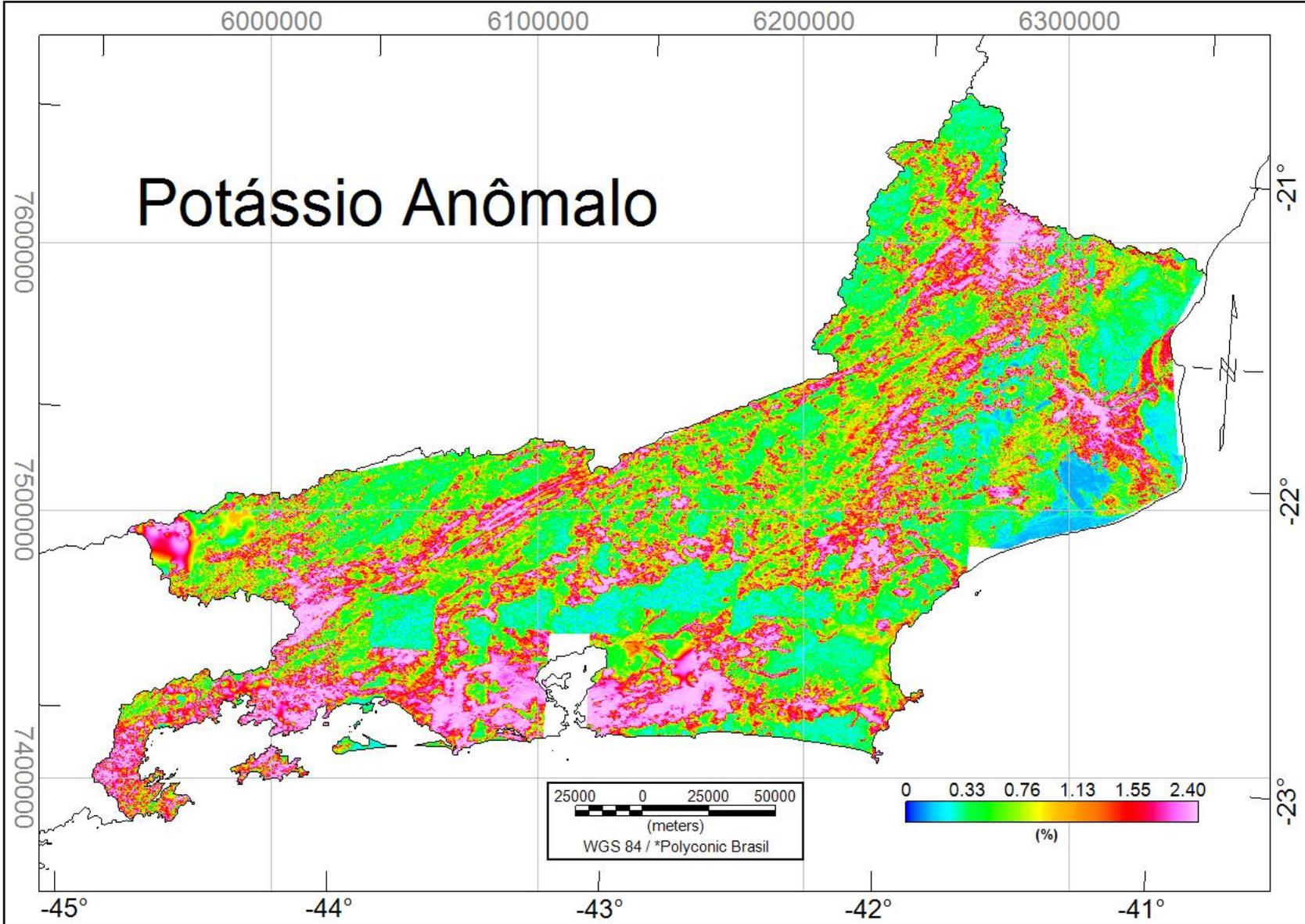


Figura 33: Mapa do Potássio Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.

O mapa da concentração do Potássio anômalo também ressalta um aspecto distinto e singular nas áreas na porção central do RJ. Essa configuração exhibe um contato muito abrupto entre anomalias e um formato geométrico bem definido, diante disso, pode-se afirmar que essas regiões apresentam problemas na base de dados relacionados às etapas de aquisição ou correção dos dados gamaespectrométricos. A figura 34 exhibe o mapa do Potássio Anômalo interpretado com essas áreas danificadas em destaque.

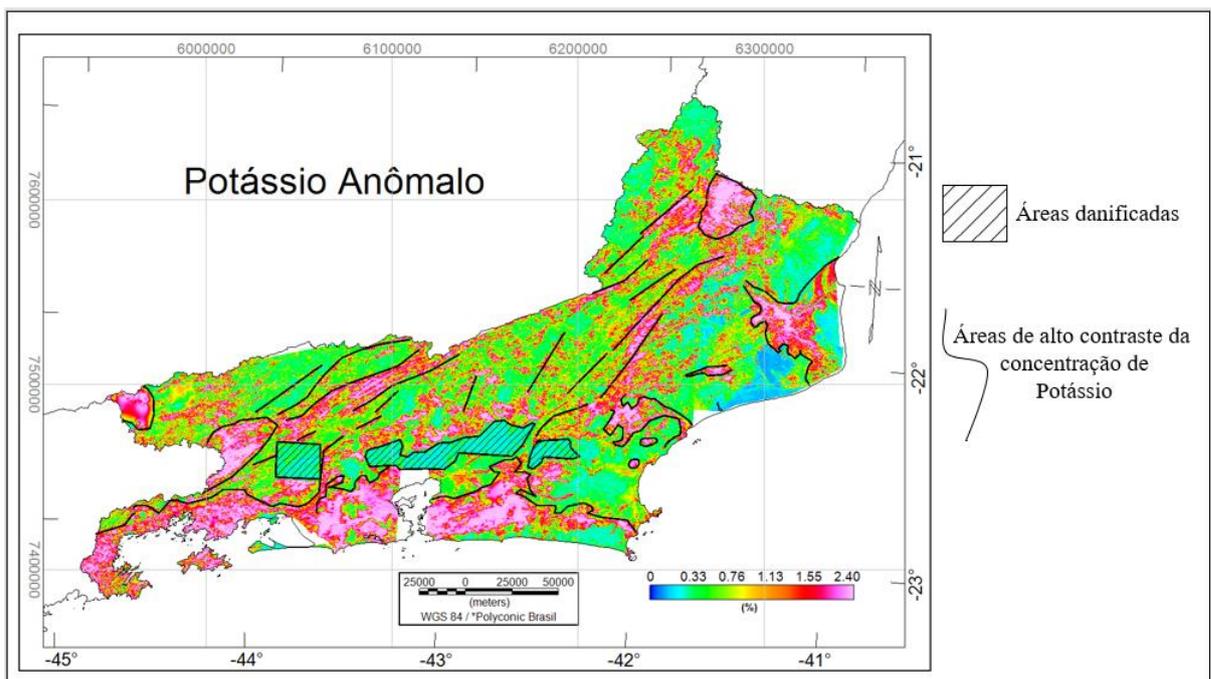


Figura 34: Mapa do Potássio anômalo interpretado e restrito ao estado do Rio de Janeiro.

O segundo mapa avaliado foi o mapa do Tório anômalo, figura 35. Através desse produto pode-se destacar a presença intensa dessas anomalias na região de estudo. Assim como no Potássio anômalo, no mapa do Tório anômalo se observa uma distribuição mais linear e com tendências NE-SW na porção centro-norte do RJ. Nota-se que a porção mais ocidental do dado é bastante marcada com Tório.

Contudo na região do Vale do Paraíba, no sudoeste do estado do Rio de Janeiro ocorre uma pequena área marcada por um baixo da concentração de Tório, que se destaca do em torno. Essa feição sinuosa e relativamente estreita foi identificada em todos os mapas temáticos, incluindo os resultados de magnetometria. A porção centro-sul do RJ também exhibe uma alta concentração desse radioisótopo, diferente da região mais sudeste do estado, no qual nota-se um padrão de baixa concentração com a presença de poucas anomalias locais. Além disso, através do mapa do Tório anômalo se identifica uma área com déficit do radioisótopo na parte mais ao nordeste e na porção Norte do estado do Rio de Janeiro

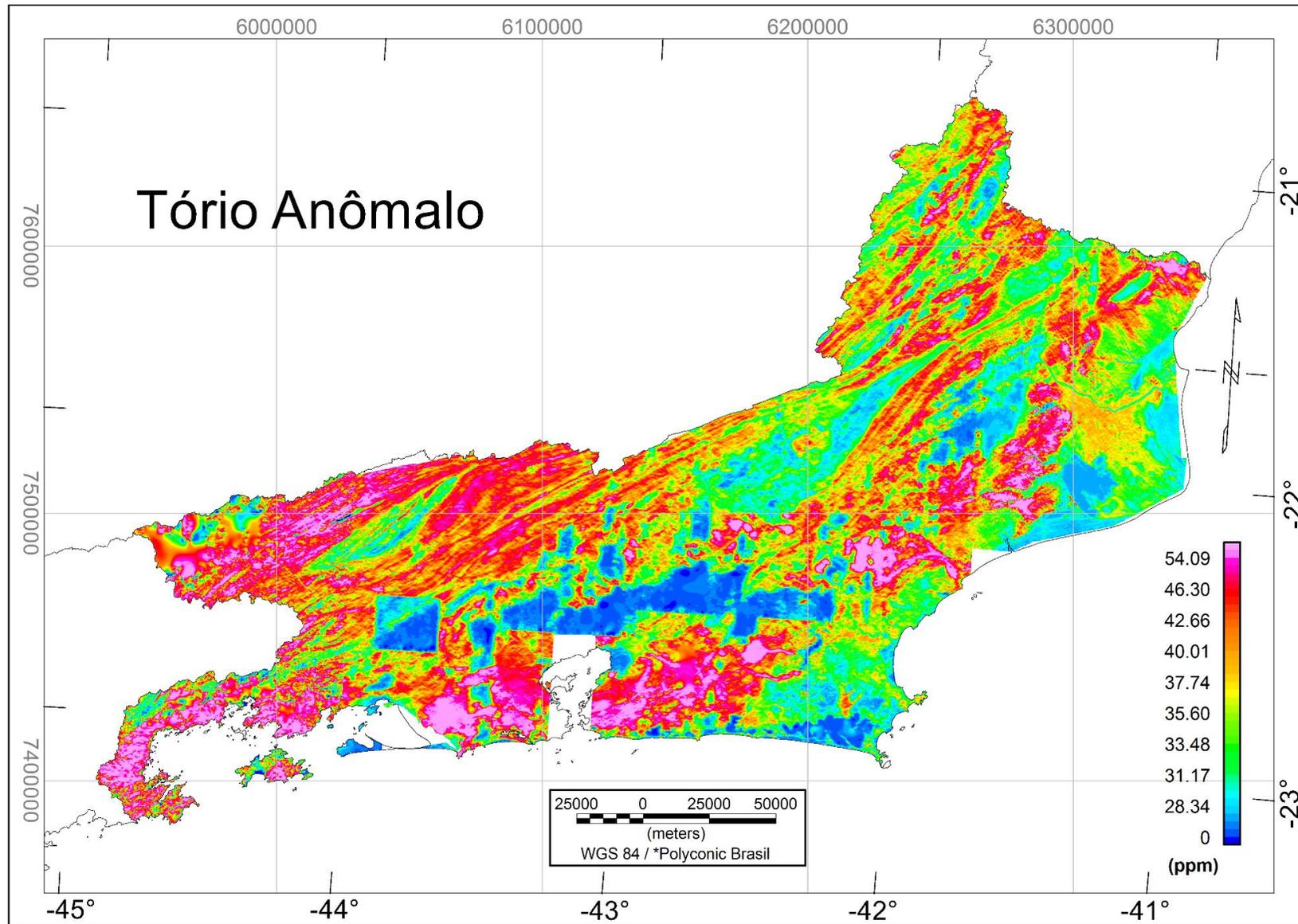


Figura 35: Mapa Tório Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.

A figura 36 exibe mapa do Tório anômalo interpretado, no qual, assim como no resultado do Potássio anômalo, também é possível identificar zonas danificadas com problemas durante aquisição ou correção dos dados gamaespectrométricos. No entanto, essa característica fica evidente também para outras regiões além daquelas estabelecidas pelo Potássio Anômalo.

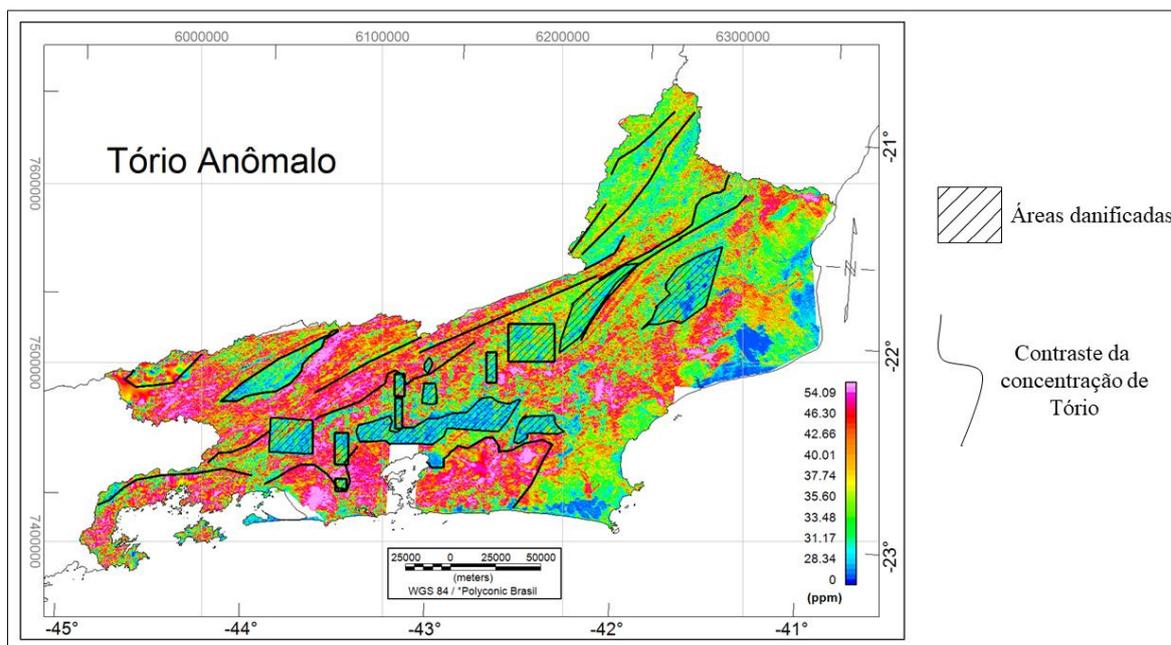


Figura 36: Mapa do Tório Anômalo interpretado e restrito ao estado do Rio de Janeiro.

O segundo mapa avaliado foi o mapa do Urânio anômalo, figura 37. De uma maneira geral, esse mapa apresenta um aspecto relativamente semelhante ao mapa do Tório Anômalo, a porção ocidental do RJ exibe uma alta intensidade do radioisótopo na porção mais ocidental do estado, em detrimento na porção oriental, que por sua vez apresenta uma baixa concentração do radioisótopo

Nota-se que uma anomalia comum nos dados magnetométricos e gamaespectrométricos que no mapa da concentração de Urânio anômalo também se destaca, essa feição está localizada próxima a divisa com os estados de Minas Gerais e São Paulo e se observa um baixo teor de Urânio nessa feição. A área ao redor dessa anomalia se apresenta bastante intensa, destacando esse baixo teor de Urânio. Assim como no mapa do Tório anômalo, outra característica presente no mapa do Urânio anômalo são as regiões danificadas.

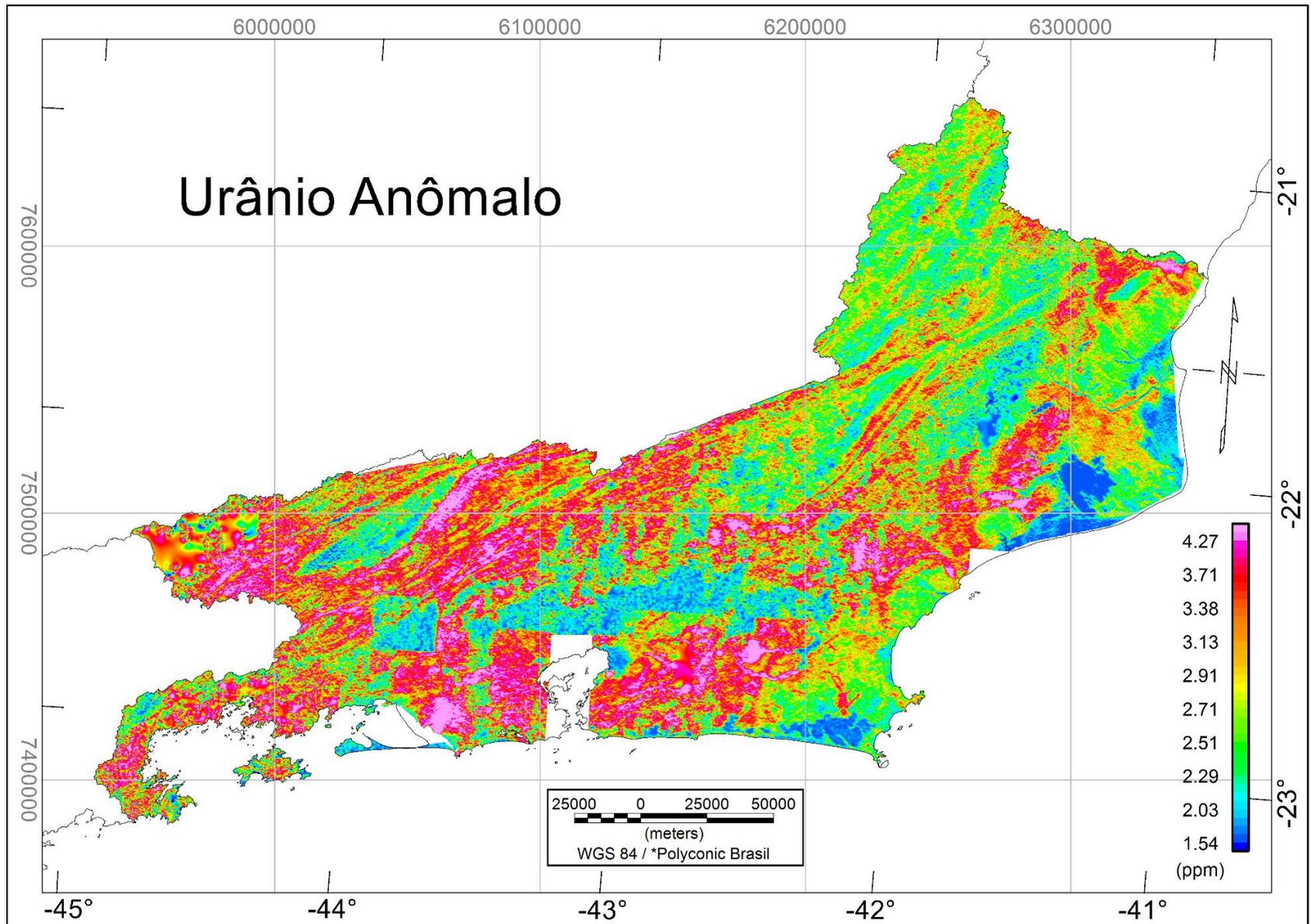


Figura 37: Mapa do Urânio Anômalo no Estado do Rio de Janeiro.

É importante ressaltar também que a porção mais ao noroeste do estado do RJ apresenta um background de baixo teor de Urânio com a ocorrência de poucas anomalias locais. A figura 38 ilustra algumas das principais características ressaltadas com esse elemento.

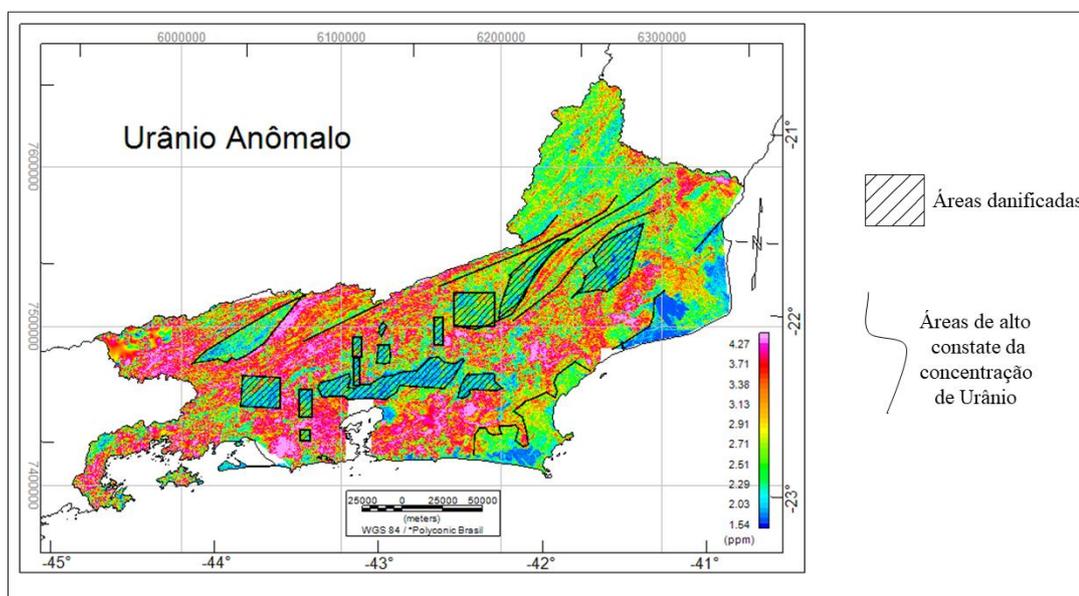


Figura 38: Mapa da concentração de Urânio Anômalo e restrito ao estado do Rio de Janeiro.

O quarto produto abordado foi a o mapa ternário do ^{40}K (%), ^{232}Th (ppm) e ^{238}U (ppm). Cabe ressaltar que o mapa ternário é uma composição dos *grids* de Tório, Urânio e Potássio, nesse sentido espera-se que as principais características observadas nos produtos anteriores também estejam evidenciadas no mapa ternário. Um exemplo disso são regiões danificadas exibidas no mapa ternário, essa característica foi herdada dos produtos gamaespectrométricos utilizados para compor o mapa. Essas áreas se destacam do restante da área de estudo por apresentar uma coloração preta, o que indica uma região com baixa contagem. Apesar disso, é possível perceber uma tendência nas regiões internas dessas áreas danificadas, o que justifica o uso de todo o conjunto do mapa ternário para colaborar na interpretação do dado gamaespectrométrico, incluindo as regiões com problemas relacionados à aquisição ou correção.

Ainda sobre o aspecto regional, no mapa ternário também é possível identificar feições lineares bem definidas e levemente sinuosas em algumas regiões, esses lineamentos se desenvolvem do sudoeste do estado e tendem para nordeste. Essa característica também é exibida nos mapas de Tório, Urânio e Potássio anômalos e, além disso, é possível visualizar que as anomalias exclusivas de cada elemento se complementam no mapa ternário. Feições lineares avermelhadas exibem uma concentração elevada de Potássio, outras com uma colora-

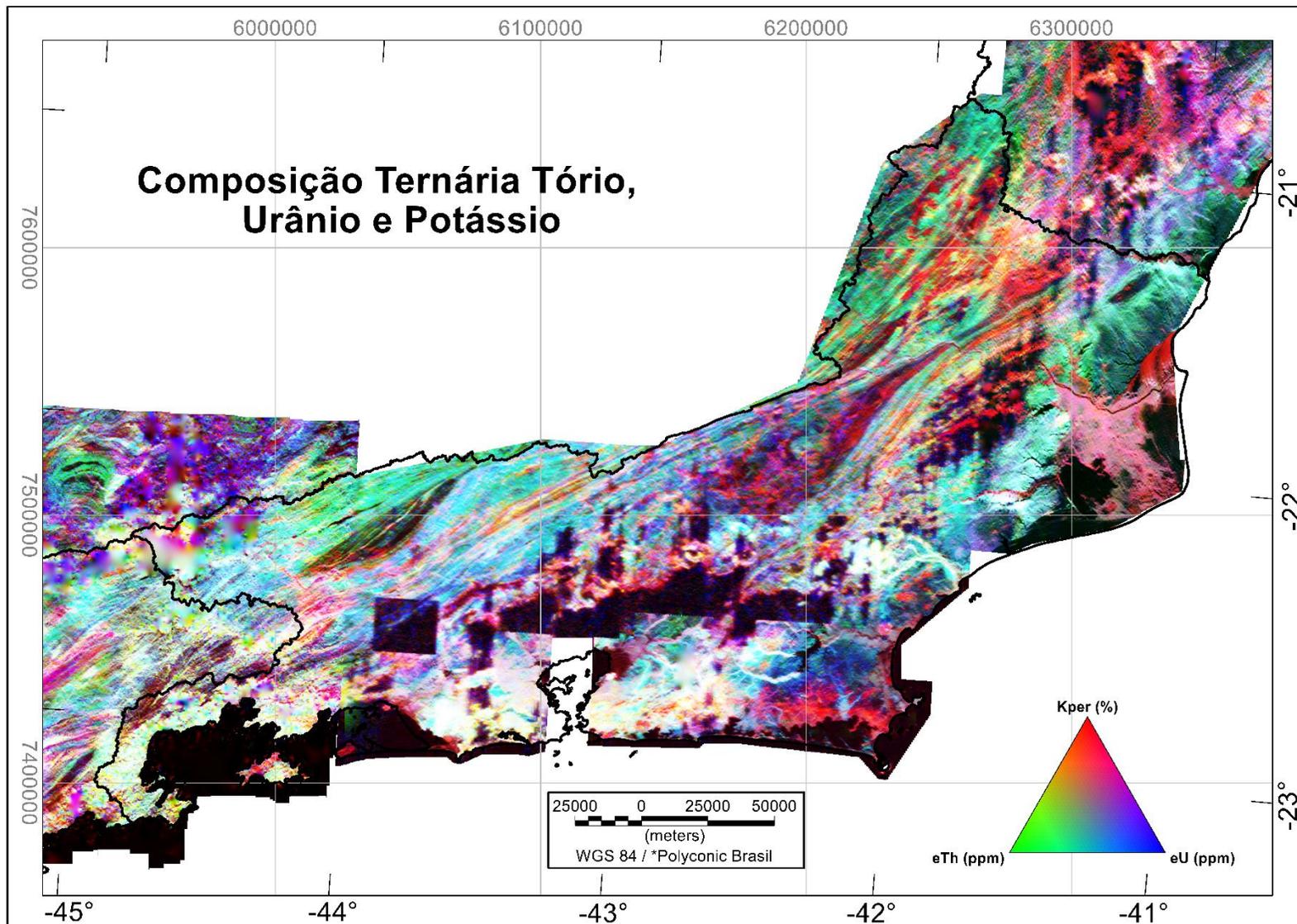


Figura 39: Mapa da Composição Ternária de Tório, Urânio e Potássio no Estado do Rio de Janeiro.

ção mais próxima do verde indicam zonas anômalas de Tório e os lineamentos azulados mostram anomalias do Urânio. É importante ressaltar que nesse tipo de produto as cores intermediárias entre o verde, vermelho e azul exibem a concentração de mais de um elemento caracterizando, assim, anomalias gamaespectrométricas. Vale ressaltar que as regiões com presença de água como, por exemplo, lagoas e o próprio oceano são identificados no mapa gamaespectrométrico com a coloração preta, tendo em vista que a água inibe o sinal gamaespectrométrico (Ribeiro *et al.*, 2013).

O mapa ternário é comumente utilizado na geologia e geofísica por evidenciar características superficiais. A área de estudo abordada, no entanto, contém uma grande variação de unidades litológicas em superfície abrangendo diferentes tipos de rochas e estruturas, o que torna a interpretação qualitativa complexa. Diante disso, a abordagem adotada para a interpretação do dado foi a definição de domínios gamaespectrométricos a partir do mapa ternário. Os domínios foram estabelecidos a partir de semelhanças de anomalias com as áreas adjacentes e, assim foram reconhecidos nove domínios gamaespectrométricos, que por sua vez estão identificados com os nove primeiros números romanos (figura 40).

O Domínio Gamaespectrométrico I apresenta uma composição bastante diferenciada do seu entorno, o que o permitiu a sua identificação. Essa região apresenta um alto teor de Urânio e Tório, mas principalmente Urânio. Nota-se a ocorrência de uma anomalia relativamente circular e de coloração branca no extremo sul do domínio. O Domínio Gamaespectrométrico II exibe um padrão de anomalia singular que se diferencia de toda área de estudo, a região está bem marcada com a concentração de Potássio e apresenta uma região preta que corresponde a uma lagoa. Adjacente ao esse domínio, uma faixa com alta concentração de Tório e *trend* NE-SW foi definido como Domínio Gamaespectrométrico III. É uma região esverdeada no qual se observa a presença de lineamentos vermelhos e pretos sinuosos com direção NW-SE. Além disso, na sua porção ocidental se identifica feições relativamente estreitas e alongadas com direções NW-SE.

O quarto domínio definido mescla diversas anomalias gamaespectrométricas. É possível identificar dentro desse domínio uma ocorrência de anomalias de Potássio e Urânio na porção centro-norte caracterizada pela cor vermelho e também por tons azulados. Na parte mais centro-oeste pode se identificar um meio mais esverdeado com algumas anomalias brancas evidenciado que nessa porção há um predomínio de anomalias associadas ao Tório, mas também ocorre altas concentrações dos três elementos radioativos. É importante ressaltar que

nesse domínio se identifica claramente lineamentos avermelhados relativamente sinuosos com direção NE-SW.

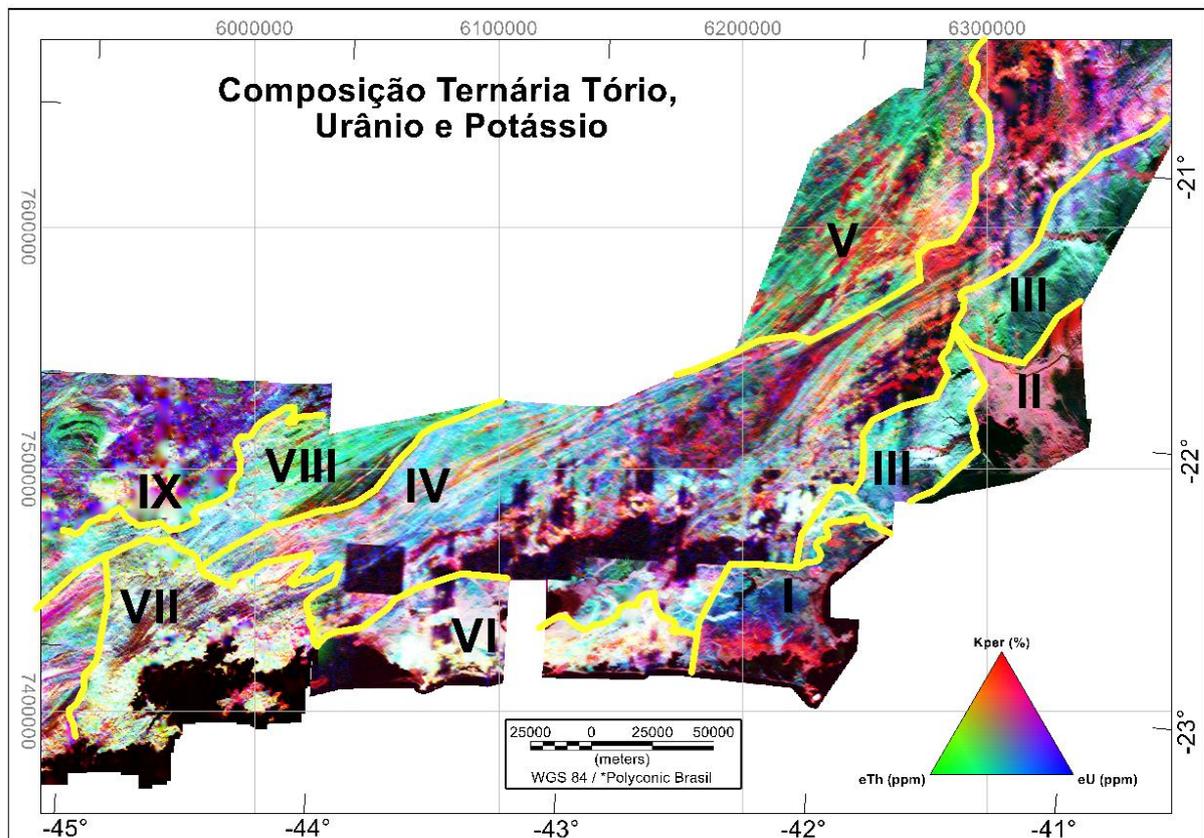


Figura 40: Mapa da Composição Ternária de Tório, Urânio e Potássio com a identificação de domínios gamaespectrométricos. Polígonos hachurados em branco destacam áreas danificadas.

O Domínio Gamaespectrométrico V apresenta um padrão de anomalias distinto no qual o seu background esverdeado é cortado pela presença de anomalias avermelhadas, ou seja, é uma região com alta concentração de Tório-Urânio, mas ocorrem anomalias de Potássio. Além disso, essa região se destaca por exibir feições sinuosas que se assemelham às dobras geológicas. O sexto domínio descrito, por outro lado, se diferenciou das regiões proximais por apresentar um padrão esbranquiçado nessa região, onde ocorrem concentrações semelhantes de Tório, Urânio e Potássio. O Domínio Gamaespectrométrico VII se destaca em função de um tom amarelado e esbranquiçados com ocorrências pontuais de anomalias vermelho-azul com *trend* NE-SW. Dessa forma, pode-se afirmar que na região há um predomínio de Potássio e Tório com zonas marcadas pela presença de Potássio-Urânio.

No Domínio Gamaespectrométrico VIII se ressalta o padrão esverdeado em todo seu domínio caracterizando altas concentrações de Tório. Contudo, o que mais se destaca nessa região é a ocorrência de uma feição linear bastante sinuosa com *trend* NE-SW, ela apresenta um aspecto de cor mais escura, mas é possível identificar a tendência de direção na sua porção

interna. Nota-se também que as porções mais orientais desse domínio exibem anomalias brancas. O último domínio gamaespectrométrico observado se destacou por ser uma região completamente anômala com uma coloração roxa relacionada com as grandes intensidades de Potássio-Urânio. Nessa região também ocorrer anomalias pontuais de Tório.

Após análises individuais dos domínios gamaespectrométricos se identificou a recorrência de um tipo de anomalia em todo em estado do Rio de Janeiro. As observações dos domínios gamaespectrométricos colaboraram para identificação de feições lineares estreitas e sinuosas, que geralmente se apresentam com uma direção preferencial NW-SE, perpendicular ao *trend* característico da área de estudo, conforme indicado pelos mapas temáticos de gamaespectrometria e magnetometria. Nota-se também que essas feições surgem atreladas, bordejando ou cruzando anomalias regionais de mesma coloração e tendem a se encontrar com região de coloração preta, ou seja, possivelmente o mar ou uma lagoa. Um exemplo disso é a região limite entre os Domínio Gamaespectrométrico I e IV, onde se observa a feição circular branca com lineamentos de mesma coloração que possivelmente são originados na maior anomalia, os lineamentos cessam sobre uma área de coloração escura (área a), o mesmo ocorre na região do Domínio Gamaespectrométrico III (área b), conforme ilustra a figura 41.

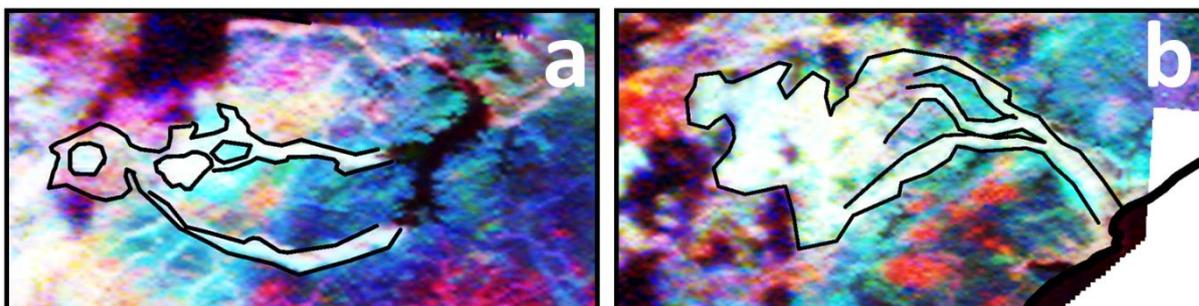


Figura 41: a) Região entre os limites dos Domínios Gamaespectrométricos I e IV exibindo centro da fonte e as feições lineares bordejando a anomalias. b) Anomalia regional de coloração branca originando lineamentos de mesmo tom.

Essa característica pode representar um cenário no qual a anomalia regional maior é o corpo provedor de sedimentos e as anomalias lineares estreitas e sinuosas com direções contrárias ao *trend* principal da área de estudo (NE-SW) representam os sistemas fluviais, que transportam os sedimentos das grandes anomalias. Essa afirmação justifica a mesma coloração das grandes anomalias e das feições lineares. Diante disso, pode-se também constatar que o padrão avermelhado das anomalias gamaespectrométricas do Domínio Gamaespectrométrico II é constituído pelos sedimentos das anomalias de Potássio do Domínio Gamaespectrométrico IV (Figura 42).

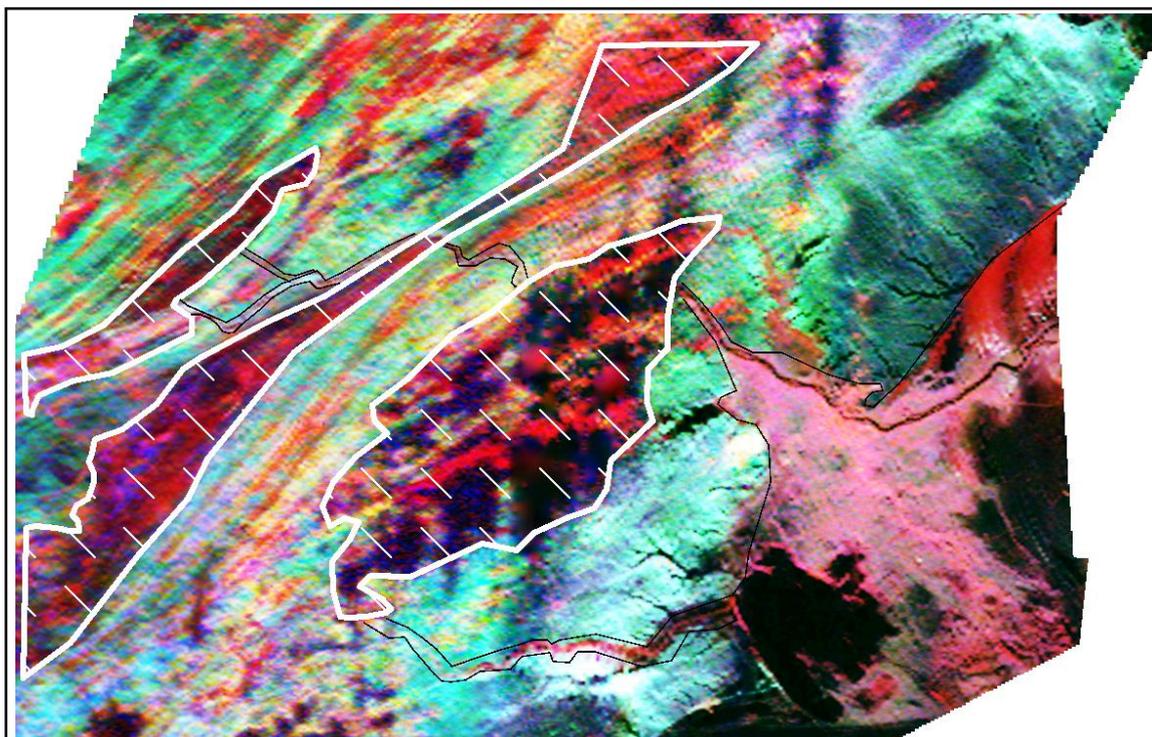


Figura 42: Em detalhe a região ao norte do RJ, o Domínio Gamaespectrométrico II alimentado por sedimentos provenientes das anomalias regionais (polígonos hachurados) do domínio IV e V. As feições lineares (linhas pretas) se assemelham à um sistema fluvial.

O último produto gerado pelo processamento de dados gamaespectrométrico foi o mapa litoestrutural geofísico, constituído por uma composição entre os *grids* das concentrações Tório, Urânio, Potássio e o *grid* da Primeira Derivada Vertical (figura 43). Com o mapa litoestrutural geofísico as características mais superficiais da região de estudo são, em teoria, evidenciadas, tendo em vista que o dado gamaespectrométrico e a primeira derivada vertical ressaltam contrastes litológicos menos profundos.

Dessa forma, através dessa composição é possível colaborar diretamente com as etapas anteriores do mapeamento geológico. Sobre uma análise regional, o mapa abordado em questão apresenta uma boa correlação com as feições gamaespectrométricas e, portanto, reforça a definição dos domínios gamaespectrométricos extraídos do mapa ternário de Tório, Urânio e Potássio, o *trend* NE-SW. O fator adicional da Primeira derivada vertical aponta com clareza as ocorrências de lineamentos magnéticos mais superficiais, que também ocorrem nas porções internas dos domínios gamaespectrométricos. Diante disso, o mapa litoestrutural geofísico é uma abordagem de caráter mais superficial.

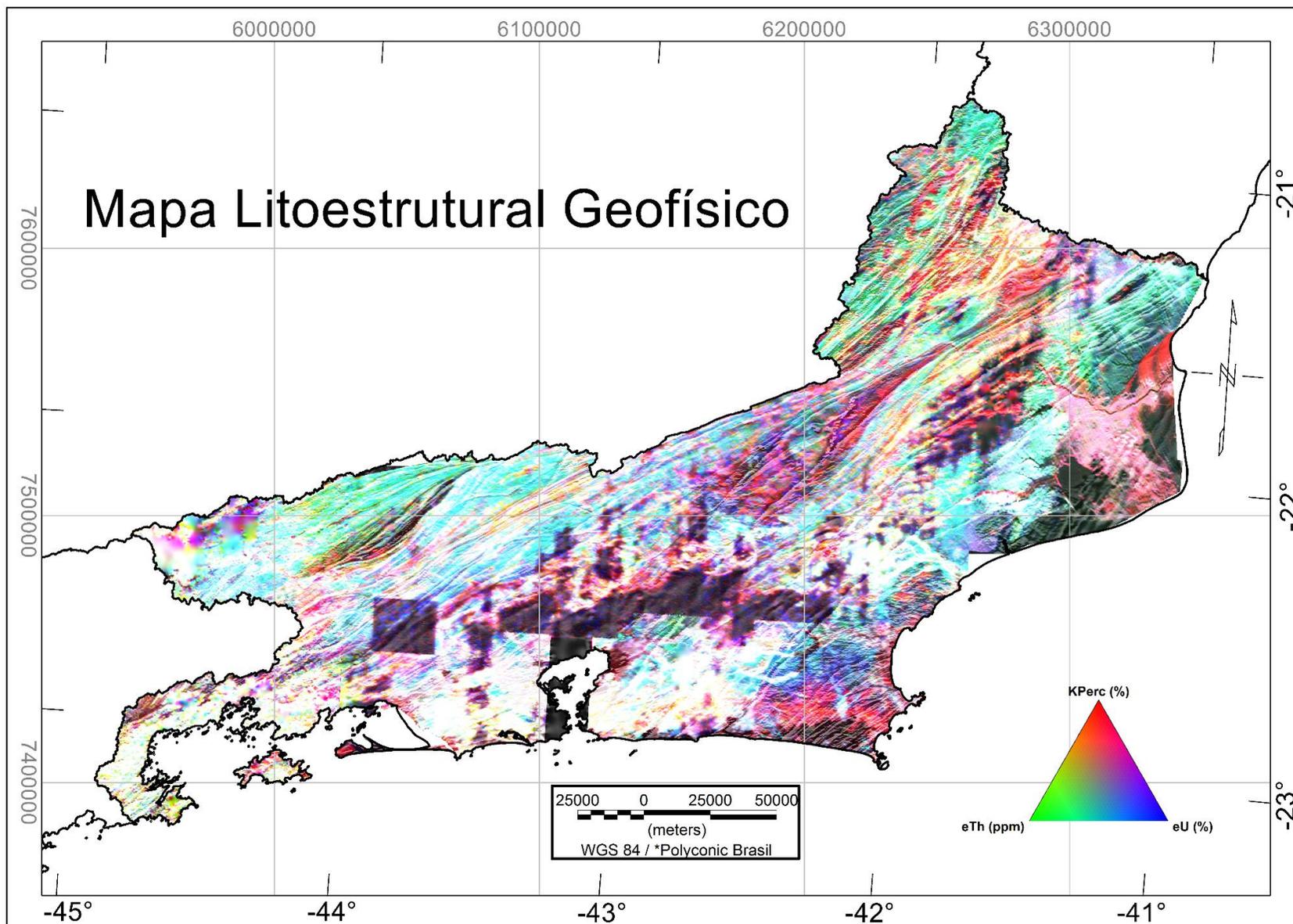


Figura 43: Mapa Litoestrutural Geofísico do Estado do Rio de Janeiro.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO MVI

O resultado obtido pela aplicação da técnica do MVI gerou um dos possíveis modelos da susceptibilidade efetiva da área de estudo, que consequentemente está diretamente associada à magnetização do meio litológico (figura 44). Cabe ressaltar que a modelagem gera um resultado que não está restrito apenas à superfície, ela também permite o estudo da variação da magnetização em subsuperfície e, dessa forma, pode colaborar diretamente com a identificação das principais configurações estruturais e geológicas.

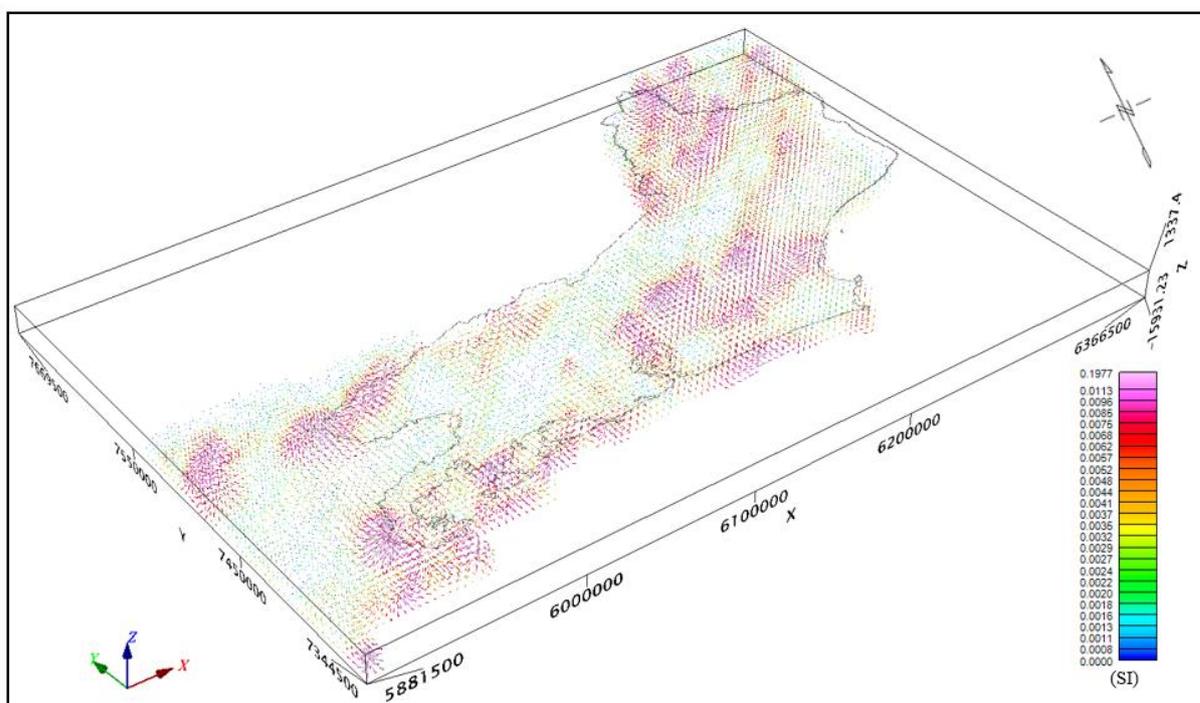


Figura 44: Resultado obtido pela Inversão do Vetor de Magnetização.

O modelo estimado, entretanto, apresenta um caráter vetorial em função da natureza da magnetização (vetor com amplitude e direção), o que torna complexa a análise qualitativa e suas correlações com a geologia à uma escala regional. Soma-se a isso, o fato do modelo abranger uma grande extensão territorial contendo valores de magnetização bastante variado. Para ilustrar essa complexidade da interpretação qualitativa regional do MVI, a figura 45 exhibe em detalhe uma região do modelo. Nessa figura se ressalta a densidade de informação associadas às distintas direções e intensidades. Além disso, é importante ressaltar conforme descrito no capítulo da metodologia, que o MVI é composto pelas projeções vetoriais: Eproj, Eperp e Amplitude.

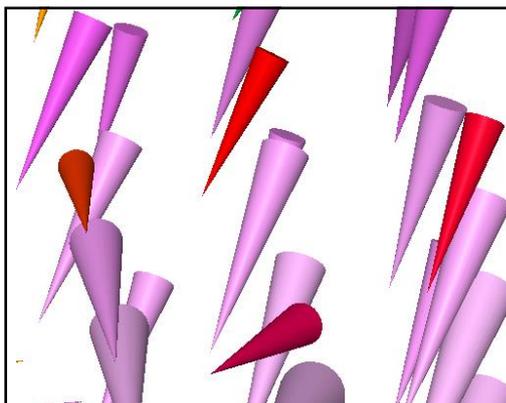


Figura 45: Em detalhe, a modelagem da susceptibilidade efetiva obtida pelo MVI.

O Eproj indica variações da magnetização paralelas ao campo magnético induzido e está relacionado à susceptibilidade magnética, enquanto o Eperp está associado às outras demais magnetizações. A componente da Amplitude é o somatório vetorial dessas duas componentes exibindo, assim, todos os fatores contribuintes para a magnetização total. Por conta disso e tendo em vista a alta complexidade da interpretação do vetor resultante do MVI, as análises e interpretações qualitativas foram efetuadas sobre o modelo da amplitude (figura 46) do vetor de magnetização desconsiderando, para o presente estudo, as análises das direções.

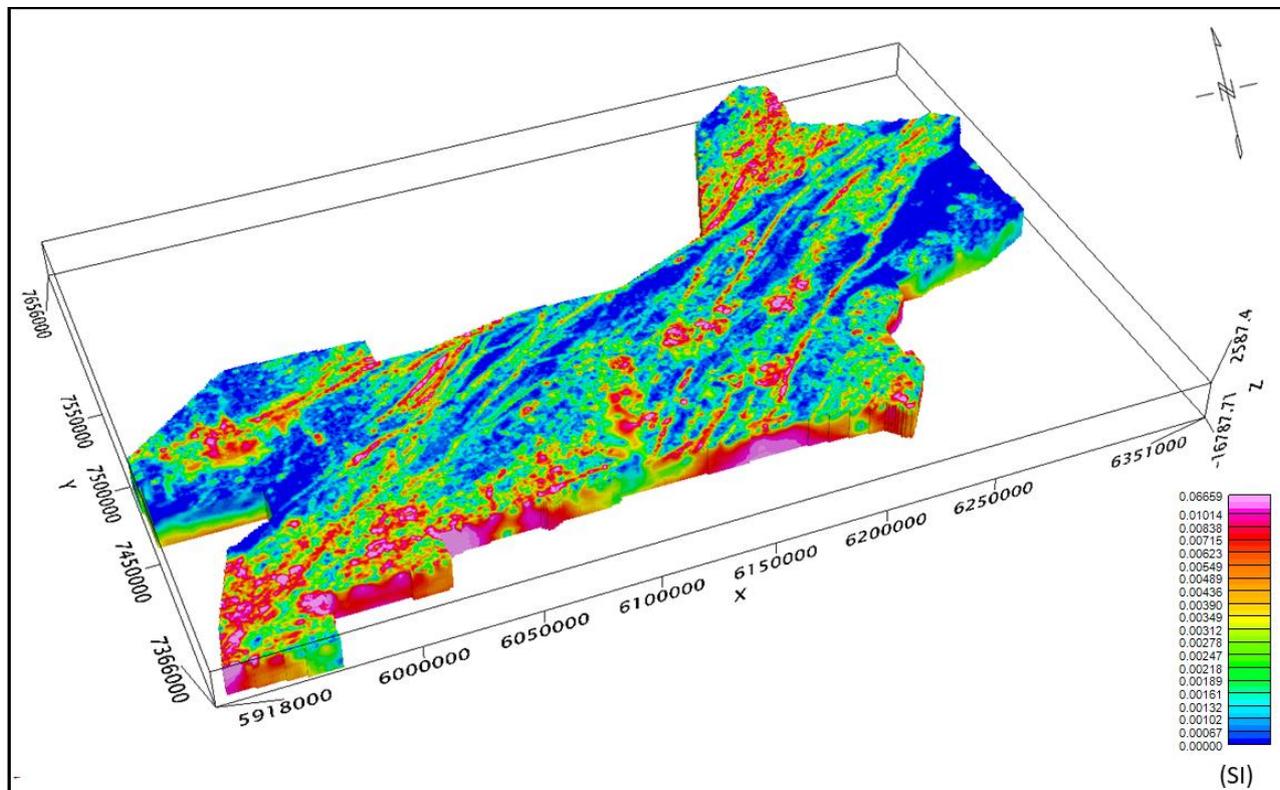


Figura 46: Modelo da amplitude da susceptibilidade efetiva obtida pelo MVI.

Sob o ponto de vista regional, a primeira característica observada na modelagem é o *background* associado à uma baixa amplitude da magnetização em contraste com anomalias de média e alta intensidade magnéticas. Além disso, se ressaltam lineamentos bem definidos com *trend* NE-SW, assim como observado nos dados magnetométricos e gamaespectrométrico. Alguns desses lineamentos se apresentam sinuosos e alternam levemente o seu azimute, mas sempre mantendo a direção preferencial (NE-SW), a maioria dessas feições mais sinuosas ocorre na porção central do RJ. Observa-se a presença dessas feições na parte mais ao norte do estado, essa região também se destaca por apresentar um conjunto de anomalias com alta intensidade de magnetização, que se diferencia bastante do restante do estado.

A porção mais ao Sul e centro-sul da área de estudo se destaca das regiões adjacentes exibindo amplitudes intermediárias marcadas por intensas magnetizações com pouca expressão em superfície, mas com grandes extensões em subsuperfície. Através da modelagem também se observou que essa característica é comum para as anomalias circulares em subsuperfície.

Outra característica importante é que a solução da inversão exibe com melhor definição as fontes de magnetização, nesse sentido os problemas relacionados às anomalias magnéticas negativas, que por sua vez, não foram bem centralizadas pela RTP, foram melhores definidas com o vetor de magnetização. Além disso, anomalias centralizadas na RTP e ASA também foram melhor definidas com a técnica do MVI.

Um exemplo que evidencia essa configuração é a anomalia que ocorre no centro-leste da área de estudo, na RTP e no ASA essa região há uma grande anomalia magnética descrita pelas duas transformações. Contudo a partir do MVI pode-se concluir que a região apresenta na parte mais próxima da superfície diversas fontes com alta amplitude de magnetização. A figura 47 exibe essa região sobre o CMA, RTP, ASA e através da amplitude do MVI.

Além dessas observações, com o MVI nota-se que o estado do Rio de Janeiro apresenta uma composição heterogênea de regiões mais ou menos magnéticas em contraste com um meio de baixa amplitude de magnetização. A porção mais ao Sul do estado se destaca pela presença de diversas anomalias, o mesmo ocorre na porção noroeste, no qual se evidencia uma região anômala com *trend* NE-SW adjacente à um baixo magnético. De uma maneira geral, o MVI se apresentou correlato com as principais características observadas pelos produtos do processamento de dados de magnetometria.

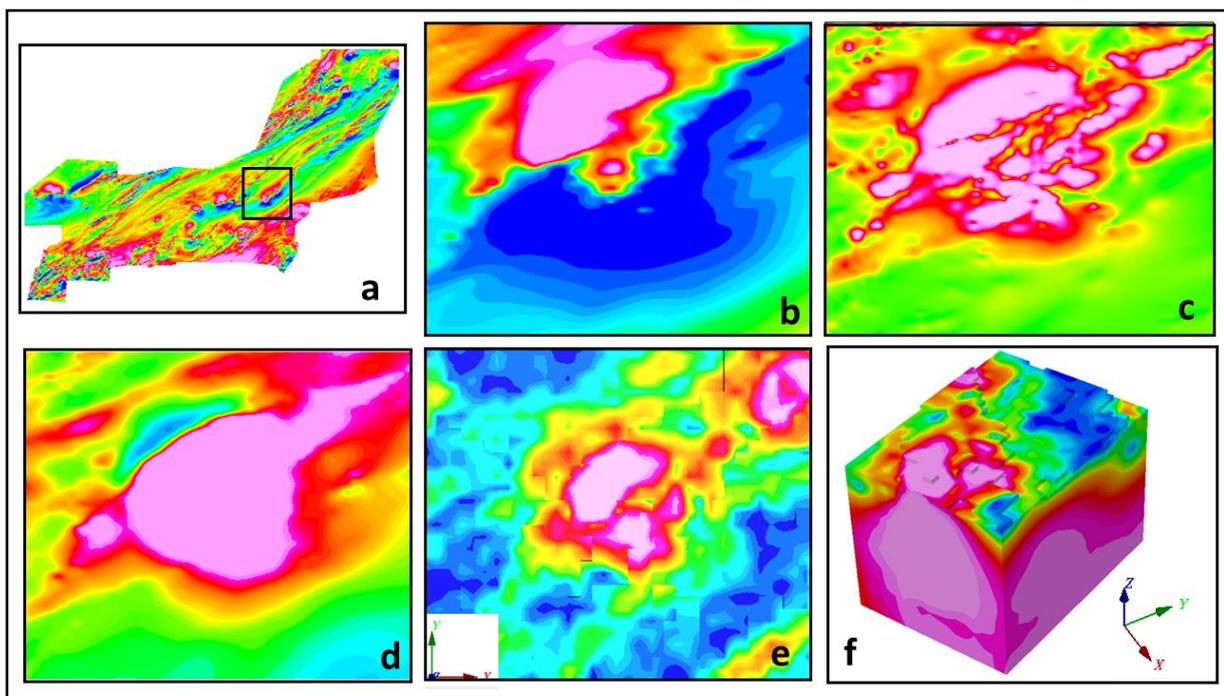


Figura 47:a) Localização da anomalia magnética na região central do RJ. A anomalia em detalhe pelo CMA (b), ASA(c), RTP (d) e pelo modelo da amplitude visto de cima (e) e em 3D (f).

5.4 CORRELAÇÕES GEOFÍSICAS-GEOLÓGICAS

A partir das análises geofísicas extraídas dos mapas temáticos foi possível correlacioná-las com as informações geológicas disponíveis, no caso com o Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. A carta geológica é um documento fundamental de uma região por conter as principais informações das unidades litológicas e estruturais. Essas informações são adquiridas a partir de observações diretas do meio, contudo essas observações muitas vezes estão limitadas à superfície. Por conta disso, optou-se por operar com dados gamaespectrométricos e magnetométricos, os distintos tipos de dados permitem uma abordagem completa dos contrastes físicos associados às diferentes unidades litológicas que, conseqüentemente, também evidenciam aspectos estruturais.

É importante frisar que as correlações das anomalias magnéticas são reflexos diretos da presença de minerais magnéticos, que por sua vez são minerais acessórios às rochas, enquanto as correlações gamaespectrométricas estão restritas aos minerais que apresentam teores significativos de Tório, Urânio e Potássio, tais como o zircão, ilmenita, K-Feldspatos e entre outros, que ocorrem sobre a superfície.

A correlação entre os mapas temáticos, a modelagem e a geologia do RJ é essencialmente regional e qualitativa, entretanto algumas feições locais se destacam do restante do conjunto e,

por conta disso também foram abordadas. O ponto de partida da análise em questão foi a identificação de semelhanças geofísicas entre os mapas temáticos descritos anteriormente e o modelo do MVI.

A primeira evidência recorrente aos mapas temáticos e à modelagem é a disposição preferencial das anomalias magnéticas e das feições gamaespectrométricas, NE-SW. Essa configuração coincide com o *trend* principal dos processos de orogênese e rifteamento no qual a área de estudo foi submetida. Essa característica é evidenciada até mesmo nos dados gamaespectrométricos em função dos constates radiométricos entre distintas unidades litológicas, que por sua vez possuem disposição e geometria alongada na direção NE-SW.

Os produtos obtidos pelos dados magnetométricos e a modelagem revelam claramente a disposição dos lineamentos magnéticos ao *trend* NE-SW evidenciando que essas feições estreitas e alongadas com magnetização anômala podem estar associadas às falhas, às intrusões ou falhas preenchidas por intrusões. Os mapas da diferença da continuação ascendente, ISA e DZ apresentam o caráter estrutural da região e, especificamente, com esses mapas temáticos essas evidências do arcabouço estrutural se confirmam.

O mapa da diferença da continuação ascendente permitiu avaliar o comportamento estrutural e sua evolução. Através desse resultado pode se afirmar que os lineamentos magnéticos se iniciam de sudoeste em direção à nordeste, mas em determinadas localidades há uma leve alternância do azimute evidenciado sinuosidades ou uma quebra mais abrupta. Essa questão pode estar diretamente associada a uma evolução mais dúctil e rúptil da crosta continental ao longo do processo de rifteamento do paleocontinente Gondwana.

O ISA contribuiu com a identificação de estruturas de uma maneira geral, apesar de apresentar um resultado bastante denso de informação, os lineamentos foram bem definidos com direção NE-SW. Além disso, há feições com direções contrárias ao *trend* que se assemelham as falhas de transferência, principalmente, na região superior do centro do estado, que por sua vez é uma região descrita por uma zona de cisalhamento.

O resultado da derivada vertical reflete que os lineamentos magnéticos não são exclusivos de grandes profundidades, eles também se apresentam na porção mais superior da crosta continental, mas não necessariamente afloram em superfície. Um exemplo disso é o lineamento extenso que ocorre na porção mais oriental do estado do rio de janeiro. Essa feição geofísica não é exibida pelos mapas gamaespectrométricos, logo esse lineamento com magnetização anômala é uma feição que não apresenta contrastes geofísicos em superfície e, portanto, pode não estar aflorando. Através do mapa geológico se observar que na região há o predomínio de

cobertura sedimentar e a feição não é descrita. Trata-se de anomalia magnética evidenciada pelos produtos magnetométricos, incluindo o MVI, que pode estar associada à uma falha que em algumas localidades a alta magnetização dentro dessa feição pode indicar a ocorrências de intrusões (Stanton, 2010).

Uma região específica do sudoeste do estado se destaca por um aspecto bastante sinuoso restringindo e diferenciado claramente essa região do restante do meio. Essa feição apresenta uma heterogeneidade de magnetização em sua porção interna, mas seu conteúdo de uma maneira geral está associado à uma alta magnetização e, além disso, se destacou também na modelagem e nos dados gamaespectrométricos. Correlacionando com o mapa geológico é possível afirmar que essa feição está atribuída a ocorrência do Complexo Juiz de Fora nessa porção do estado do Rio de Janeiro. Sobre uma perspectiva regional, a ocorrência dessa litologia está associada diretamente aos grandes contrastes de magnetização em função, possivelmente, da presença de minerais magnéticos tais como, por exemplo a magnetita, nessa unidade litológica.

Através do mapa geológico se observa que o Complexo Juiz de Fora não está restrito apenas a porção sudoeste do RJ, ele também aflora na parte noroeste do estado. Especificamente nessa região, os dados geofísicos revelam uma unidade magnetométrica diferenciada, que por sua vez foi definida como Domínio Magnético Noroeste. Conforme descrito anteriormente, nesse domínio magnético as variações do campo magnético anômalo são intensas e seus lineamentos magnéticos com *trend* NE-SW podem estar relacionados aos processos de orogênese do Brasileiro. Além disso, assim como observado nas descrições geofísicas a ocorrência de feições sinuosas na parte mais ao norte desse domínio magnético fazem referências diretas às dobras estruturais recorrente na região, tendo em vista que essa porção está associada à parte mais retrabalhada do cráton do São Francisco. De forma análoga a região sudoeste do RJ, na região noroeste do estado os picos de magnetização estão relacionados aos minerais magnéticos da unidade litológica. Em relação aos dados gamaespectrométricos, o Complexo Juiz de Fora também é bem definido com um *background* de anomalias de Tório em contraste com altas concentrações de Urânio, principalmente na região noroeste do estado do RJ.

Outra feição tangente aos mapas geofísicos e ao MVI são as anomalias relativamente circulares, que correspondem às intrusões alcalinas e granítica que compõem a geologia do estado do Rio de Janeiro. As intrusões alcalinas Itatiaia, Passa Quatro, Morro Redondo, Complexo do Medanha, Tinguá, Itaúna, Soarinho, Tanguá, Rio Bonito, Morro dos Gatos,

Morro de São João e a Ilha de Cabo Frio foram melhor caracterizadas com os mapas magnéticos, mas também ocorrem evidência dessas intrusões nos mapas gamaespectrométricos. O Morro de São João, por exemplo, é evidenciado em todos os mapas temáticos com um formato bastante circular, no mapa ternário e no mapa litoestrutural geofísico a intrusão se destaca por apresentar teores altos de Potássio e Urânio, que podem estar associados à nefelina sienitos que compõem o maciço. Ao sudoeste do RJ se destacam duas anomalias magnéticas associadas as intrusões alcalinas: o Complexo Alcalino do Itatiaia e o Morro Redondo. O Morro dos Gatos não é evidenciado tão claramente por estar associado ao Granito Silva Jardim, que também apresenta intensa anomalia magnética.

As intrusões graníticas, por outro lado se destacamem claramente em ambos dados geofísicos. Nos mapas temáticos de magnetometria e pela inversão essas anomalias aparecem bem definidas, nos mapas da composição ternária e litoestrutural geofísico essas anomalias estão evidenciadas pela coloração branca relacionada aos altos teores de Tório, Urânio e Potássio. É preciso ressaltar que essas anomalias em especial, se concentram na porção centro-sul do RJ e apresentam uma tendencia NE-SW. Na região definida como Domínio Magnético Central pode-se ideentificar a presença de diversas anomalais desse tipo, que estão diretamente associadas ao Arco Magmático Rio Negro. Apesar do dado gamaespectrométrico apresentar problemas nessas regiões, com os mapas temáticos obtidosdo processamento de dados magnetométricos é possível extrair correlações diretas entre as anomalias e os corpos aflorantes em superfície.

Vale ressaltar que toda suite Nova friburgo se destacou nos mapas geofísicos, tendo em vista o seu magmatismo pós-colisonal. O Granito Sana da suíte Nova Friburgo, por exemplo, é bastante evidenicado nos mapas magnetometrico e está associado à maior anomalia magnética observada em toda área de estudo. Essa característica tem relação direta com a concentração de minerais magnéticos na região tais como, a magnetita. Além disso, ele é bem definido no mapa ternário pela coloração branca associados à presença de K-Feldspatos, biotita, titanita e zircão e, nessa área ainda pode-se observar a presença do sistema fluvial transportado sedimentos do Sana. O mesmo ocorre com o Granito Silva Jardim, ambos foram caracterizados pela figura 41, o Sana é a anomalaia gamaespectrométria 41a o Silva Jardim 41b. A figura 47 exhibe a anomalia magnética que possivelmente está associada ao granito Sana.

Além disso, outra característica que diferencia o Granito Silva Jardim das demais anomalias magnética do RJ é alta magnetização nas bordas do corpo em dentrimento de uma baixa magnetização em seu centro. Essa questão é bastante evidenciada nos mapas da DZ e da

diferença da continuação ascendente, no qual a sua circunferência apresenta um alto relevo magnético nas extremidade e um baixo em direção ao centro. Na natureza, os granitos podem apresentar alta ou baixa intensidade magnética em função do contexto da temperatura associada a sua formação (Dentith & Mudge, 2014). Soma-se a isso o fato dos minerais que apresentam maiores teores de magnetização serem formados ao início-meio do processo de resfriamento, tais como a magnetita e ilmenita, enquanto no final do processo há a formação de minerais não magnéticos como, por exemplo, o quartzo. A heterogenidade das magnetização observada nesse corpo é singular quando comparado com as demais anomalias magnéticas no estado do Rio de Janeiro, essa questão pode ser uma evidência do processo de resfriamento do granito Silva Jardim, os extremos do granito com alta magnetização estão associados aos minerais magnéticos que se formaram no início-meio do resfriamento, em contraste com os minerais menos magnéticos que se formaram no final do processo do resfriamento. Com isso, o Silva Jardim possivelmente resfriou a partir de suas porções periféricas para ao centro.

Outra feição associada à uma intrusão granítica ocorre na divisa do RJ com MG, apesar de não ser uma feição circular, a sua geometria é simétrica, linear, alongada e com direção NE-SW e se destaca por conta da magnetização negativa que a anomalia apresenta. Essa anomalia está relacionada à Pedra Selada, que é descrita como uma intrusão granítica sin-colisional. Cabe ressaltar conforme descrito no item das análises magnetométricas, essa anomalia só foi melhor caracterizada com o auxílio do MVI, o mesmo se observa na porção mais ao sul do RJ próximo a região do Complexo Alcalino de Tanguá, no qual há um lineamento magnético bem definido adjacente à essa anomalia circular. Essa feição não apresenta evidências nos dados gamaespectrométricos e geológicos. Através do mapa geológico se observa que na área estabelecida por essa anomalia ocorre sedimentos da formação Macacu. Dessa forma, pode se afirmar que essa anomalia negativa está restrita apenas ao ambiente de subsuperfície.

De uma maneira geral, essas feições associadas as intrusões graníticas e alcalinas são descritas pela modelagem do MVI como anomalias de magnetização pontuais em superfície, mas que se apresentam com grandes extensões laterais em profundidade, ou seja, é possível observar a continuação das anomalias de magnetização em profundidade. Contudo, tendo em vista que o presente estudo abordou as principais feições sobre uma escala regional, sugere-se estudos mais aprofundados dessas anomalias magnéticas circulares associadas às intrusões graníticas e alcalinas com uso de modelagens geofísicas e suas correlações com as informações gamaespectrométricas e geológicas sobre uma abordagem mais local dessas ocorrências, incluindo estudos dos transportes sedimentares dessas anomalias.

Do ponto de vista regional, observou-se em ambos os dados geofísicos que o estado do Rio de Janeiro é composto por regiões no qual os padrões de anomalias magnéticas e gamaespectrométricas se assemelham em suas porções internas diferenciando, dessa forma, essas regiões de todo o restante da área de estudo. Sobre esse aspecto, o Domínio Magnético Cabo Frio estabelecido pelo CMA é evidenciado de forma singular em todos os mapas temáticos, especificamente no mapa da diferença da continuação ascendente é possível observar que essa região apresenta uma textura magnética. Esse domínio magnético faz referência ao Domínio Tectônico Cabo Frio, proposto por Schmitt (2004) novos estudos, entretanto propõem que esse domínio tectônico também se estende mais ao norte (Stanton, 2019). A partir dos mapas temáticos de geofísica, principalmente com os magnetométricos pode-se identificar que o Domínio Magnético Cabo Frio está correlacionado diretamente com essa unidade tectônica. As altas intensidades de magnetização observada na área podem estar associadas ao enxame de diques que ocorre nessa região. O MVI exhibe anomalias de magnetização intensa nessa região com continuação em profundidade.

A porção mais ao norte desse domínio é marcado por uma resposta do CMA menos intensa que nas demais regiões do domínio tectônico, o que diferencia levemente as assinaturas magnéticas dentro desse contexto. Essa questão pode estar relacionada ao fato do embasamento cristalino ser mais profundo na região norte do Domínio Magnético Cabo Frio. O mapa da DZ colabora para essa evidência, a porção mais ao norte desse domínio magnético apresenta anomalias menos marcadas, diante disso pode se afirmar que anomalias magnéticas que ocorrem nessa região estão restritas às maiores profundidades e a unidade litológica correspondente ao Domínio Magnético Cabo Frio está sobre a bacia de Campos.

Além disso, através do mapa do CMA pode-se afirmar que as principais características identificadas dentro do Domínio Magnético Central estão intrinsecamente relacionadas com o Domínio Tectônico Oriental. Conforme descrito nos itens anteriores, o Domínio Magnético Central é marcado por *background* de baixo magnético com destaque para as anomalias que ocorrem na porção central desse domínio, que já foram correlacionadas ao Complexo Rio Negro. Em contraste com o Domínio Magnético Central, o Domínio Magnético Paraíba do Sul se mantém coerente com o Domínio Tectônico Oriental e Paraíba do Sul. A região definida como Domínio Magnético Paraty também faz relações diretas ao Complexo Rio Negro, as evidências magnetométricas revelam um caráter marcado pela alta intensidade de magnetização com múltiplas fontes na região. Soma-se a isso, as evidências gamaespectrométricas, que

exibem um padrão de anomalias esbranquiçadas com tons amarelados associadas às intrusões graníticas desse domínio tectônico.

A partir dos mapas temáticos gamaespectrométricos duas unidades anômalas se ressaltam na porção litoral nordeste do RJ indicando que essas feições estão restritas à porção mais superficial. Uma dessas anomalias é marcada por uma coloração avermelhada homogênea no mapa da composição ternária, essa feição além de exibir uma alta concentração de potássio está relacionada ao avanço do delta do Paraíba do Sul. Através desse mapa pode-se identificar a extensa planície formada por cordões arenosos com alta concentração de minerais provenientes das rochas adjacentes ao percurso do rio, em sua maioria minerais do tipo feldspato. A outra região anômala próximo a desembocadura do rio Paraíba do Sul é marcada por um tom esverdeado, sua geometria é paralela à costa e faz referência direta à Formação Barreiras

Sobre uma perspectiva regional o mapa temático da Inclinação do Sinal Analítico colabora para identificação de fatores associados à geologia estrutural, tendo em vista a sua natureza de ressaltar constates laterais que são evidenciados por um alto gradiente horizontal. Dessa forma, o ISA também exerce forte influência para correlações geológicas, por conta disso optou-se por sobrepor o mapa geológicos do RJ com transparência de 50% sobre o ISA, figura 48. Nessa imagem é possível identificar como os contrastes litológicos são evidenciados no ISA e, além disso, o *trend* NE-SW é bem definido. É possível observar que mesmo diante de um mapa denso de informações, o ISA revela lineamentos concentrados na porção mais central e oriental, esses lineamentos podem apresentar continuidade na região *offshore* do estado. Um exemplo claro disso ocorre na região definida como Domínio Magnético Paraty, no qual os lineamentos presentes nessa região podem ser uma continuação dos demais lineamentos que compõem o RJ e apresentam evidências de sua respectiva continuação em direção ao oceano. Na região do Terreno Tectônico Cabo Frio o mesmo ocorre, os lineamentos magnéticos com *trend* NE-SW podem apresentar continuação na porção *offshore*.

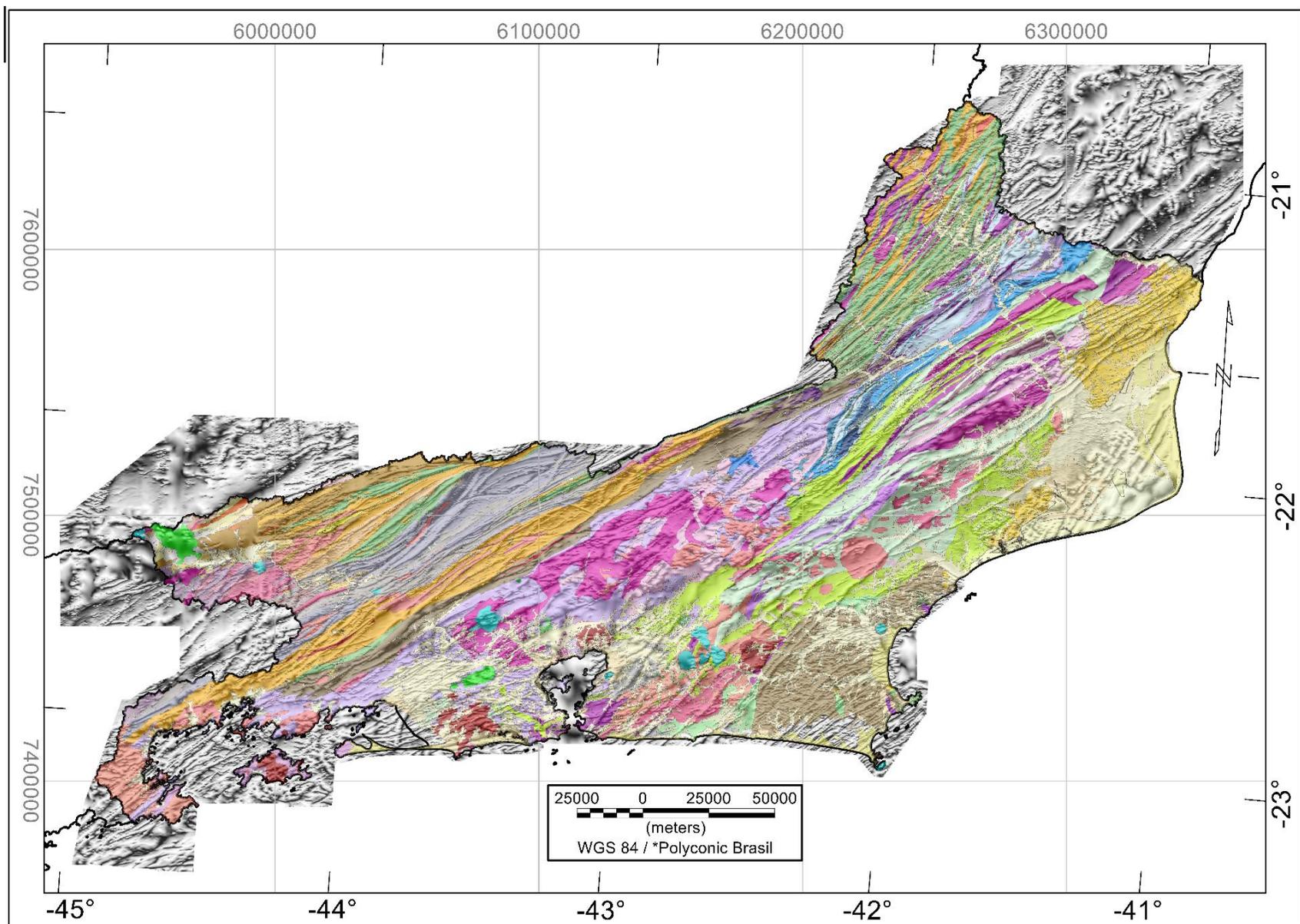


Figura 48: Mapa da Inclinação do Sinal Analítico sobreposto ao Mapa Geológico com transparência de 50%.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6. CONCLUSÕES

A metodologia aplicada aos dados públicos se mostrou eficaz para elaboração do conjunto de dados geofísicos restrito ao estado do Rio de Janeiro. Mapas temáticos de magnetometria e gamaespectrometria e a modelagem da susceptibilidade magnética efetiva foram elaborados e apresentados ao longo do presente estudo. Além disso, as etapas envolvidas para obtenção dos respectivos produtos geofísicos são descritas de forma detalhada e simplificada. É importante ressaltar que os dados operados pelo presente estudo foram disponibilizados com todas as correções de pré-processamento efetuadas, nesse sentido trabalhou-se diretamente com os dados associados aos contrastes físicos das unidades litológicas. De uma maneira geral, os dados envolvidos apresentaram uma boa resolução das anomalias geofísicas.

A metodologia de integração entre os dados de magnetometria foi distinta daquela aplicada aos dados gamaespectrométricos. Contudo, a integração entre os dados dos três projetos aerogeofísicos utilizados para compor a geofísica do RJ foi satisfatória. O primeiro problema envolvido na integração foi a operação entre distintas zonas UTM, a conversão cartográfica foi a solução eficiente que possibilitou a integração entre os dados. Em seguida foi necessário verificar se a união entre os o Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117), Projeto Aerogeofísico São José dos Campos-Resende (Projeto 1105) e Projeto Aerogeofísico Espírito Santo (Projeto 1093) poderia ser executada para se extrair o conjunto de dados geofísicos do RJ. Essa característica foi confirmada com o mapa da distribuição dos dados dos projetos aerogeofísicos, no qual foi observado que as regiões extremas dos projetos eram tangentes entre si e/ou sobrepostos. A partir dessa etapa também se constatou que algumas áreas não foram prospectadas, a solução aplicada foi o *blanking distance* restrito à uma ordem de dezena de quilometro.

Em seguida cada método geofísico foi processado individualmente. Cabe ressaltar que o processamento aplicado aos dados de gama foi mais complexo quando comparado ao processamento dos dados magnetométricos mediante à alta sensibilidade dos dados gamaespectrométricos às variações das concentrações dos radioelementos na natureza. Por outro lado, apesar do processamento de magnetometria ser mais objetivo e simples, a união entre os três projetos aerogeofísicos gerou ruídos bem definidos nas porções mais periféricas do projeto 1117 e, por conta disso foi necessária à aplicação da técnica da decorrução ao *grid*

do CMA referente ao estado do RJ. Ao fim do processamento de dados magnetométricos e gamaespectrométricos foram obtidos os mapas temáticos.

Com os mapas magnetométricos foi possível identificar regiões singulares que se diferenciavam do em torno por apresentarem um padrão de anomalias magnéticas na sua porção interna, dessa forma o presente estudo definiu domínios magnéticos. Parte dos domínios magnéticos estabelecidos se mostraram semelhantes aos domínios tectônicos existentes no estado do Rio de Janeiro como, por exemplo o Domínio Magnético Cabo Frio que está relacionado com o domínio tectônico homônimo. Nessa região se observou uma alta magnetização que pode estar associada à ocorrência de diques. Os Domínios Magnéticos Paraíba do Sul e Noroeste foram correlacionados com o Domínio Tectônico Oriental e marcam altas intensidades do campo magnético anômalo. Além disso, através dos resultados magnetométricos é possível identificar o Arco Magmático Rio Negro na porção definida como Domínio Magnético Central, nessa região há o maior pico de magnetização registrado pelo levantamento de dados do Projeto Aerogeofísicos Rio de Janeiro (1117).

Vale lembrar que para interpretar dados magnetométricos é importante obter transformações do CMA para ressaltar feições que não evidentes no campo magnético anômalo. Contudo, é preciso analisar cautelosamente os produtos gerados pelo processamento de dados de magnetometria. A RTP obtida pelo presente estudo, por exemplo, não apresentou um resultado satisfatório, o mapa da RTP não modificou anomalias magnéticas negativas e a correlação entre o mapa geológico e a RTP exibe divergências, dessa forma, apenas a identificação dos lineamentos NE-SW e as anomalias circulares foram extraídas da RTP. O mapa da Amplitude do Sinal Analítico também apresentou resultados que dificultavam a identificação de anomalias individuais, tendo em vista que esse resultado agrupou anomalias magnéticas.

De forma análoga à magnetometria, com o mapa da composição ternária gamaespectrométrica foram identificados domínios gamaespectrométricos, que ressaltam feições associadas às litologias que afloram em superfície. A Formação Barreiras pode estar relacionada à uma anomalia de Tório. Os granitos que compõem o estado do RJ estão evidenciados pelas cores branca e amarela, e mostram altas concentrações dos radioisótopos. Além disso, se observou feições lineares oriundas dessas anomalias associadas aos granitos que podem definir aos sistemas fluviais adjacentes à unidade litológica.

Os resultados geofísicos obtidos pelo presente estudo se mostraram coerentes quando comparados com o mapa geológicos do RJ, as anomalias traduzem o comportamento físico de unidades litológicas que podem aflorar em superfície ou não e, dessa forma, os mapas geofísicos

podem dialogar com estudo pretéritos e contemporâneos da geologia do estado. Por conta disso, trabalhou com dados magnetométricos e dados gamaespectrométricos, que se complementam e permitem uma abordagem completa do comportamento físico da área de estudo. Os resultados de gama estão restritos às análises superficiais e podem dialogar diretamente com o mapa geológico, enquanto os resultados extraídos do processamento de magnetometria revelam o comportamento do campo magnético anômalo em superfície e subsuperfície. O MVI exhibe a reconstrução da susceptibilidade magnética, o que implica diretamente na análise da magnetização das rochas que compõem o RJ. É importante ressaltar, que o resultado do MVI apontou com clareza a correlação direta entre anomalias de magnetização e rochas com alto teor de minerais magnéticos. A partir do MVI pôde-se observar o comportamento da magnetização anômala em profundidade.

De uma maneira geral, todos os mapas geofísicos mostram a ocorrência de feições lineares com *trend* NE-SW, que correspondem as estruturas e litologias deformadas pela orogênese e pelo rifteamento que afetaram toda a região. A identificação de lineamentos, principalmente os magnéticos, reflete um arcabouço estrutural complexo no estado do Rio de Janeiro, um estudo detalhado desses lineamentos pode colaborar com maior conhecimento da evolução estrutural tangente à região. Além disso, as intrusões alcalinas e graníticas foram destacadas pelas anomalias magnetométricas e gamaespectrométricas como feições com geometria semelhante à um círculo.

Além disso, problemas relacionados à aquisição e/ou etapas de correção dos dados geofísicos no Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro foram evidenciados nos mapas geofísicos. Os dados gamaespectrométricos foram os mais afetados por essa problemática, contudo os mapas geofísicos não estão em sua maioria danificados e podem ser utilizados para análise geofísicas- geológicas no âmbito regional. As áreas danificadas no RJ foram identificadas, mas se observa uma tendência em sua porção interna que colabora para interpretações regionais e, por conta disso, as áreas danificadas não foram descartadas.

A combinação entre o mapa gamaespectrométrico ternário e o mapa da derivada vertical efetuada para gerar o mapa lito estrutural geofísicos é uma outra questão abordada pelo presente estudo e pode contribuir diretamente para a técnica de mapeamento geológico, tendo em vista que o mapa ternário exhibe feições associadas às litologias que afloram e o mapa da derivada vertical reflete conteúdo de alta frequência marcado contrastes superficiais.

De uma maneira geral, as observações extraídas dos mapas temáticos e os resultados obtidos podem contribuir com avanços nas discussões sobre a evolução geológica da área de

estudo. Apesar dos dados utilizados para o presente estudo estarem concentrados na porção continental é possível através dos dados magnetométricos observar que as anomalias geofísicas não estão restritas apenas ao continente e podem apresentar sua respectiva continuação na porção *offshore*.

6.1 SUGESTÕES

O presente estudo abordou interpretações qualitativas sobre uma perspectiva regional, diante disso, sugere-se estudos mais detalhados e locais das anomalias evidenciadas ao longo do presente trabalho. Trabalhos de campo, análises petrofísicas e modelagens da magnetização efetiva podem colaborar com estudos mais detalhados da área e suas correlações geológicas. Isso se aplica as anomalias associadas às intrusões graníticas e alcalinas como é o caso do Granito Silva Jardim e o Sana, no qual também se sugere trabalhos sobre os sistemas fluviais adjacentes às anomalias. Em relação as anomalias identificadas através dos resultados magnetométricos e que não possuem evidências superficiais recomenda-se a utilização de outras abordagens para identificação dessas feições que podem estar cobertas por depósitos sedimentares.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aisengart, T. 2015. Qualitative and Quantitative Magnetization Vector Inversion applied to the Pirapora Anomaly. 14th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces; an introduction. *Earth Science Reviews*, 17:1-29.
- Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, v. 22, p. 359-383.
- Baranov, V., & Naudy, H. (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics*, v. 29, p. 67-79.
- Blakely, R.J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University Press.
- Boyle RW. 1982. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. *Developments in economic geology*, n.16, p. 71-78.
- Briggs IC. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1): 39-48.
- Blum M.L.B., 1999. *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Tese de Doutorado, Inst de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- 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. 10.1590/S0102-261X2009000400009.
- Dentith, M. & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge: Cambridge University Press, 135-159.
- Ellis, R.G., Wet, B., Macleod, I.N., 2012. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources, 22nd International Geophysical Conference and Exhibition, Australia.
- Fernandes, G., Schmitt, R., Bongioiolo, E., Basei, M., Mendes, J., (2015). Unraveling the tectonic evolution of a Neoproterozoic–Cambrian active margin in the Ribeira Orogen (Se Brazil): U–Pb and Lu–Hf provenance data. *Precambrian Research*. 266. 10.1016/j.precamres.2015.05.017.
- Geosoft, 2007. *Getting started with GridKnit*. Geosoft Inc, Toronto.

- Gunn, P.J., Minty, B.R.S., Milligan, P.R. 1997. The airborne gamma-ray spectrometry response over arid Australian terranes. In: *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 733-740.
- Heilbron, M., Mohriak, W. U., Valeriano, C. M., Milani, E.J., Almeida, J., Tupinambá, M. 2000. From collision to extension: The roots of the southeastern continental margin of Brazil. In: Mohriak, W. U. and Talwani, M. (eds) *Atlantic Rifts and continental margins*. American Geophysical Union, Geophysical Monographs, 115, 1–32.
- Heilbron, M. and Machado, N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira belt SE Brazil. *Precambrian Research* 125, 87–112.
- Heilbron, M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Campos Neto, M. C.; Silva, L. C.; Trouw, R. A. J. & Janasi, V. A. 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso 148 NETO, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. (Eds.). *O Desvendar de Um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda. 203-234.
- Heilbron, M., Valeriano C. M., Tassinari, C.C.G., Almeida J.C.H., Tupinambá M., Siga Jr. O., Trouw, R.J.A., 2008. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: Pankhurst, R.J.; Trouw, R.A.J, Brito Neves, B.B.; De Wit, M.J. (Eds). *West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. The Geological Society of London*. London 294, 211-237.
- Heilbron, M., Eirado L., Almeida, J., Tupinambá, M., Valeriano, C., Geraldés, M., Peixoto, C., Willians, S., Dourado, F., Palermo, N., Melo, R., Guimarães, P., Ragatky, C. D., la Terra André Pires Negrão, E., Coelho Brêda, T., Ramos, R.. (2016). Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:400.000
- IAEA, International Atomic Energy Agency, 1991. Airbone gamma ry spectrometer surveying, International Atomic Energy Agency. Technical Reports Serie No, 323, Vienna, Austria, 97p.
- IAEA, International Atomic Energy Agency, 2003. Guidelines for radioelement using gamma ray spectrometry data. Vienna, Austria, 173p.
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I.: (2009) *Geofísica de Exploração*, Trad. Maria Coelho (coord.) et al. Ed. Oficina do Texto, São Paulo, SP.

- Lima, D.P.D., 2015. Caracterização Geofísica da Região Sudeste do Brasil a partir de Dados Potenciais Satelitais: Porção Centro-Norte. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília – UnB, 72 p.
- Luyendyk, A.P.J.(1997). Processing of Airborne Magnetic Data. AGSO Journal of Australian Geologist and Geophysicist, v.17, p.31-38.
- Miller HG & Singh V. 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics, 32(2-3): 213-217.
- Minty B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. Exploration Geophysics, 22:591-592.
- Moxham, R.H. (1963). Natural radioactivity in Washington County, Maryland. *Geophysics*, 28,262-72.
- Nabighian, M.N. (1972). The analytical signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, p. 507-517.
- Nabighian, M.N. (1974)., Additional comments on the analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: *Geophysics*, 39, 85-92.
- Pires, A.C.B. & Harthill, N.. (1989). Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixás-Itapaci area, Goiás, Brazil. *Geophysics*, 54, 1326-32
- Reeves, C. 2005. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice and Interpretation*. Geosoft. E-book. 34-35.
- Ribeiro, V. B., Mantovani, M. S. M., Louro, V. H. A. (2013). Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terrae Didactica*, 10, 29-51. <https://doi.org/10.20396/td.v10i1.8637386>.
- Schmitt, R.S., Trow, R. A. J., Van Schmus, W.R., Pimentel, M.M.. (2004). Late amalgamation in the central part of West Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil). *Precambrian Research* 133, 29–61.
- Schmitt, R.S., Trow, R. A. J., Van Schmus, W.R. and Passchier, C.W., 2008. Cambrian orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil) and correlations within West Gondwana: ties that bind underwater. Geological Society, London, *Special Publications* 294, 279-296.
- Shkromada, D. O. (2014). Interpretação de dados aerogeofísicos para exploração aurífera na área do anticlinal Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Brasil.

- Silva, J.B.C. (1986). Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low-latitude anomalies. *Geophysics*, v. 51, p. 369-382.
- Silva F.V. 1999. Integração gamaespectrométrica-geológica da Folha Curitiba-PR. Departamento de Geologia, Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Dissertação de Mestrado, 204p.
- Sousa, F. R. F. R. O, 2018. Modelagem geológico-geofísica aplicada ao domínio da zona transversal – província Borborema. Tese de Doutorado, Inst de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- Spector, A., & Grant, F.S.1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35 (2), 293-302.
- Stanton, N. & Schmitt, R., Galdeano, A., Maia, M., Mane, M A.. (2010). Crustal structure of the southeastern Brazilian margin, Campos Basin, from aeromagnetic data: New kinematic constraints. *Tectonophysics*. 490. 15-27. 10.1016/j.tecto.2010.04.008.
- Stanton, N., Kuszniir, N., Gordon, A., Schmitt, R.. (2019). Architecture and Tectono-magmatic evolution of the Campos Rifted Margin: Control of OCT structure by basement inheritance. *Marine and Petroleum Geology* 100, 43-59.
- Swain CJ. 1976. Reduction-to-the-pole of regional magnetic data with variable direction, and its stabilization at low inclinations. *Exploration Geophysics*, 31(1-2): 78-83.
- Telford WM, Geldart LP & Sheriff RE. 1990. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p.
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Valeriano, C., Júnior, R. P., Dios, F. B., Machado, M., Silva, L. G. E., Almeida, J.C.H., 2012. Juvenile contribution of Neoproterozoic Rio Negro Magmatic Arc (Ribeira Belt, Brazil): implications for Western Gondwana amalgamation. *Gondwana Research* 21, 422–438.
- Thurston JB & Smith RS. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI - method. *Geophysics*, 62(3): 807-813.
- Vasconcelos, R. M.; Metelo, M. J.; Motta, A. C.; Gomes, R. D. - 1994 - Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil. CPRM, Rio de Janeiro.
- Verduzco B, Fairhead C, Green, C & Mackenzie C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23:116-119.

Williams, N.C., 2006. *Applying UBC-GIF potential field inversions in Greenfields or Brownfields exploration*. Artigo apresentado durante o AESC2006, Melbourne, Austrália, 10 p.

