UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EXPRESSÃO GEOFÍSICA DOS DIQUES DO FEIXE DE LINEAMENTOS COLATINA, ES, BRASIL

Júlia Cotta Maciel Dantas

MONOGRAFIA Nº 226

Ouro Preto, maio de 2017

EXPRESSÃO GEOFÍSICA DOS DIQUES DO FEIXE DE LINEAMENTOS COLATINA, ES, BRASIL

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.ª Dr.ª Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo do Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Luís Antônio Rosa Seixas

MONOGRAFIA

Nº 226

EXPRESSÃO GEOFÍSICA DOS DIQUES DO FEIXE DE LINEAMENTOS COLATINA, ES, BRASIL

Júlia Cotta Maciel Dantas

Orientador

Prof. Dr. Fernando Flecha de Alkmim

Co-orientadora

Prof.ª Dr.ª Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2016/2.

OURO PRETO

2017

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br
Escola de Minas - http://www.em.ufop.br
Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Júlia Cotta Maciel Dantas

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

D192e Dantas, Júlia Cotta Maciel.
Expressão geofísica dos diques do Feixe de Lineamentos Colatina, ES, Brasil [manuscrito] / Júlia Cotta Maciel Dantas. - 2017.

76f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Flecha de Alkmim.
Coorientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

1. Geofísica. 2. Prospecção - Métodos potenciais. 3. Deconvolução de Euler. I. Alkmim, Fernando Flecha de. II. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Titulo.

CDU: 550.3(815.2)

Catalogação: ficha@sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Expressão Geofísica dos Diques do Feixe de Lineamentos Colatina, ES, Brasil

AUTORA: JULIA COTTA MACIEL DANTAS

ORIENTADOR: Prof. Fernando Flecha de Alkmim

Aprovada em: 16 de maio de 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Fernando Flecha de Alkmim		DEGEO/UFOP
Prof. Maximiliano Martins		DEGEO/UFOP
Prof. Thiago José Augusto Madeira		DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 16/05/2017

Agradecimentos

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha família pela base, ao meu noivo pelo apoio, aos amigos de graduação pelo companheirismo e a todos os meus professores e ao PET Geologia por contribuírem para minha formação profissional e pessoal.

À CPRM, CODEMIG, UCSD e ao geofísico Antonino Juarez Borges pelo fornecimento de dados.

E, em especial, à minha co-orientadora, Maria Sílvia Carvalho Barbosa, pela paciência e dedicação e ao meu orientador, Fernando Flecha de Alkmim, pela disponibilidade e confiança.

Sumário

AGRADECIMENTOS ..... **ix**
Lista de Figuras ..... **xiii**
Lista de Tabelas ..... **xvii**
RESUMO ..... **xix**
ABSTRACT ..... **xxi**
1- INTRODUÇÃO **1**
1.1- Apresentação 1
1.2- Objetivos 2
1.3- Justificativa 2
1.4- Estratégia de ação, materiais e métodos 2
2- CONTEXTO GEOLÓGICO DO FEIXE DE LINEAMENTOS COLATINA **5**
2.1- Introdução 5
2.2- O Orógeno Araçuaí 5
2.3- Geologia da região afetada pelo Feixe Colatina 8
2.3.1- Estratigrafia 8
2.3.2- Geologia Estrutural e Geotectônica 12
2.4- Aspectos morfológicos da região do feixe 14
2.4.1- Geomorfologia 14
3- MÉTODOS GEOFÍSICOS **17**
3.1- Introdução 17
3.2- Métodos Potenciais 17
3.2.1- Gravimetria 17
Anomalia Free Air 22
Anomalia Bouger 23
3.2.2- Magnetometria 23
3.2.3- Análise quali-quantitativa de métodos potenciais 27
Filtros de Fourier 27
Deconvolução de Euler 27
3.3- Radiometria 29

4- ANÁLISE QUALITATIVA 33
4.1- Introdução 33
4.2- Metodologia para confecção de mapas temáticos 33
4.3- Gravimetria 36
4.4- Magnetometria 38
4.5- Radiometria 44
5- ANÁLISE QUANTITATIVA 47
5.1- Introdução 47
5.2- Metodologia para inversão de métodos potenciais 47
5.3- Resultados das inversões pela Deconvolução de Euler 50
6- INTEGRAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA 55
6.1- Introdução 55
6.2- Análise regional 55
6.3- Análise local 62
6.4- Considerações finais 70
7- CONCLUSÕES 71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização do Feixe de Lineamentos Colatina 1

Figura 1.2- Localização da área de estudo de detalhe em relação à área de estudo regional e ao Feixe de Lineamentos Colatina 3

Figura 2.1- Localização do Orógeno Araçuaí Congo Ocidental com relação à porções brasileira e africana 6

Figura 2.2- Mapa geológico-tectônico simplificado do núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí 7

Figura 2.3- Mapa geológico do Feixe de Lineamentos Colatina 9

Figura 2.4- Localização da área de estudo de detalhe e diques aflorantes da Suíte Fundão 11

Figura 2.5- Morfoestruturas da região do Feixe de Lineamentos Colatina e da área de estudo 14

Figura 2.6- Unidades geomorfológicas da região do Feixe de Lineamentos Colatina com enfoque na área de estudo 15

Figura 3.1- Comparação entre o esferoide de referência da Terra e o geoide de acordo com variações laterais de densidade 19

Figura 3.2- Anomalia gravimétrica residual de acordo com a variação entre as densidades teórica e medida 20

Figura 3.3- Representação do campo magnético da Terra e da orientação da limalha de ferro por uma barra imantada 24

Figura 3.4- Histograma mostrando a variação da susceptibilidade magnética nos principais tipos de rocha 26

Figura 3.5- Diagrama correlacionando a abundância de elementos radioativos em determinados tipos de rocha 26

Figura 4.1- Mapas da Anomalia gravimétrica Bouger, em escala regional e local (em detalhe) 33

Figura 4.2- Fluxograma com processamento de dados na geração dos mapas de métodos potenciais 35

Figura 4.3- Fluxograma com os passos para geração dos mapas gravimétricos 36

Figura 4.4- Mapa de Anomalia Bouger e mapa de domínios gravimétricos 37

Figura 4.5- Fluxograma com os passos para geração dos mapas magnetométricos 39

Figura 4.6- Mapa de Anomalia de Amplitude do Sinal Analítico e mapa de magnetofacies 40

Figura 4.7- Compilação dos lineamentos anteriores sobre o mapa ASA 42

Figura 4.8- Mapas de continuação para cima da área de estudo de detalhe com filtros 43

Figura 4.9- Fluxograma apresentando os mapas radiométricos 44

Figura 4.10- Imagem ternária e mapa de domínios radiométricos 45

Figura 4.11- Mapas dos canais de (A)U, (B)Th e (C)K 46

Figura 5.1- - Malha local de deconvolução magnetométrica sob o Mapa ASA 48

Figura 5.2- Exemplos de i*nputs* no *software* Euler 1.0 para o perfil local 21 49

Figura 5.3- Exemplos de i*nputs* no *software* Euler 1.0 para o perfil regional 4 49

Figura 5.4- Comparação dos modelos tridimensionais em escala local (magnetométrico) e regional (gravimétrico) 50

Figura 5.5- Visualização no ArcScene dos dados das anomalias magnetométricas 51

Figura 5.6- Visualização no ArcScene dos dados das anomalias gravimétricas 51

Figura 5.7- Visualização do processo de modelagem local 52

Figura 5.8- Interpretação dos lineamentos pela análise quantitativa (A) e análise quantitativa (B) sobre o modelo magnetométrico 3D da área de estudo de detalhe 53

Figura 6.1- Área regional com limites de municípios do Espírito Santo e área de estudo de detalhe 56

Figura 6.2- Imagem de satélite SRTM regional com as áreas de estudo e lineamentos NW-SE destacados 56

Figura 6.3- Mapa geológico simplificado com os principais litotipos da área regional 57

Figura 6.4- Expressão da mesma feição na imagem SRTM (A), mapa geológico (B) e mapa gravimétrico Bouger (C) e mapa magnetométrico ASA (D) sobrepostos pelo contorno geológico 58

Figura 6.5- Expressão da anomalia circular no mapa gravimétrico Bouger (A), mapa geológico (B) e mapa magnetométrico ASA (C)..... 58

Figura 6.6- Mapa gravimétrico Bouger superposto ao mapa geológico e com os perfis de deconvolução, área local e diques mapeados em campo identificados 59

Figura 6.7- A) Dados do perfil 3 gerado no *software* Euler 1.0 composto de três partes (de cima para baixo): dados das anomalias gravimétricas do mapa Bouger, gradientes verticais e horizontais e repostas das fontes das anomalias em profundidade; B) Localização do Perfil 3 no mapa gravimétrico Bouger regional e C) Modelo de krigagem 3D, feito a partir da Deconvolução de Euler do mapa gravimétrico Bouger, mostrando a profundidade estimada do topo das anomalias gravimétricas 60

Figura 6.8- Mapa magnetométrico de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) superposto ao mapa geológico regional e com as áreas de estudo regional e local delimitadas 61

Figura 6.9- Feixe de lineamentos Colatina (direção NW-SE) expresso nos mapas magnetométricos: A) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); B) Campo Anômalo; C) Derivada em X (DX); D) Derivada em Y (DY) e Derivada em Z (DZ) 62

Figura 6.10- Roseta com as principais direções de lineamentos encontradas na análise dos mapas magnetométricos 62

Figura 6.11- Comparação entre imagem SRTM (A), mapa magnetométrico DZ (B) e lineamentos traçados na análise qualitativa descrita no capítulo 4 (C)..... 63

Figura 6.12- Correlação entre (A) mapa de litotipos de escala regional (Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo/CPRM) e (B) mapa geológico de detalhe do Feixe Colatina 64

Figura 6.13- Mapa magnetométrico ASA (A) e mapa gravimétrico Bouger (B) sobrepostos pelo contorno litológico do mapa geológico regional (A.1 e B.1) e do mapa do Feixe Colatina (A.2 e B.2)..... 66

Figura 6.14- Imagem ternária RGB sobreposta pelos contornos litológicos do mapa geológico regional (à esquerda) e mapa de domínios radiométricos(à direita). 67

Figura 6.15- Respostas do "norito" São Gabriel da Baunilha nos diferentes mapas: (A) magnetométrico (ASA); (B) geológico; (C) geológico do Feixe de Lineamentos Colatina; (D) gravimétrico Bouger e (E) imagem ternária RGB 68

Figura 6.16- Modelo magnetométrico 3D da área de estudo de detalhe. (A) Modelo sobreposto pelo mapa magnetométrico ASA; (B) Visualização esquemática das respostas da Deconvolução de Euler dos perfis 25 e 26; (C) Aproximação do modelo na região com maior incidência de diques e resposta dos perfis 25 e 26 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Relação entre propriedade física e método geofísico associado 17

Tabela 3.2- Exemplos de variação de densidade entre rochas 19

Tabela 3.3- Correções gravimétricas 21

Tabela 3.4- Correções magnetométricas 27

Tabela 3.5- Filtros de Fourier e suas finalidades 28

Tabela 3.6- Principais Índices Estruturais 29

Tabela 3.7- Ocorrência de K, Th e U em diferentes minerais 30

RESUMO

O Feixe de Lineamentos Colatina é uma expressão de longas fraturas, de direção preferencial N15W, associadas a diques máficos. O Feixe Colatina ocupa uma área de aproximadamente 7500km² no estado do Espírito Santo e encontra-se instalado nos domínios do orógeno Araçuaí. O presente trabalho propôs o estudo geofísico da área de maior incidência destes diques máficos em superfície, visando investigar seu comportamento em subsuperfície. Para isso, foram feitas análises qualitativas e quantitativas, em escala regional e local, dos métodos de magnetometria, gravimetria e radiometria. A interpretação geofísica se deu a partir da confecção de mapas temáticos, filtragens e aplicação da inversão 2D (Deconvolução de Euler) nos métodos potenciais, permitindo a observação em profundidade e geração de modelos 3D. Por fim, foi feita a integração geológico-geofísica, juntando os dados de mapeamento geológico (da literatura) com os de mapeamento geofísico realizado neste estudo. Deste modo, foi possível "visualizar" o Feixe de Lineamentos Colatina em profundidade, confirmar sua direção de lineamentos principal e evidenciar o caráter superficial dos diques pertencentes à Suíte Fundão. Além disso, foi encontrada ainda uma expressiva anomalia gravimétrica na área regional para qual se sugere estudos mais aprofundados.

ABSTRACT

The Colatina lineament zone is an expression of extensive fractures, associated with mafic dikes with a N15W trend. This region occupies an area of approximately 7500km² in the State of Espírito Santo and is lodget in the Araçuaí orogen domain. This undergraduation final paper come up with the geophysical study of the area of greatest concentration of dikes in surface, allowing its study in subsurface. From magnetometric, gravimetric and radiometric data, qualitative and quantitative analyzes were done, in regional and local scale. The geophysical interpretation involved the preparation of thematic maps, filtrations and the use of the inversion method (Euler Deconvolution) for a 3D model generation. Lastly, the geological-geophysical integration was made by gathering literature field mapping records and geophysical data from this review. This way was possible to "visualize" the Colatina Lineaments zone in depth, to confirm its preferential trending and to evidence the surface expression of the dikes from the Fundão suite. Moreover, an expressive gravimetric anomaly was found in the regional area for which new studies are proponed.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O conhecimento geológico foi construído fundamentalmente a partir trabalhos de campo. Reconhecer e analisar as estruturas e rochas em superfície ainda constitui uma tarefa essencial. Entretanto, existem situações que requerem análises mais completas que nem sempre são possíveis a partir dos métodos de mapeamento convencionais. Neste contexto, surge a geofísica como a principal ferramenta utilizada para análises em subsuperfície.

O trabalho em questão contém uma análise geofísica da feição regional conhecida como Feixe de Lineamentos Colatina, localizada no estado do Espírito Santo entre as cidades de Vitória e Ecoporanga, cuja área excede 7.500 km² (Figura 1.1). Trata-se de um elemento morfoestrutural composto por grandes lineamentos de direção NNW, muitos dos quais preenchidos por diques, em sua maioria, basálticos. Mas como seria o comportamento destes diques em profundidade? A partir da integração de dados geológicos, geofísicos e bibliográficos, procurou-se, no presente estudo, investigar o comportamento em subsuperfície dos lineamentos e diques máficos da Suíte Fundão que marcam o Feixe Colatina.

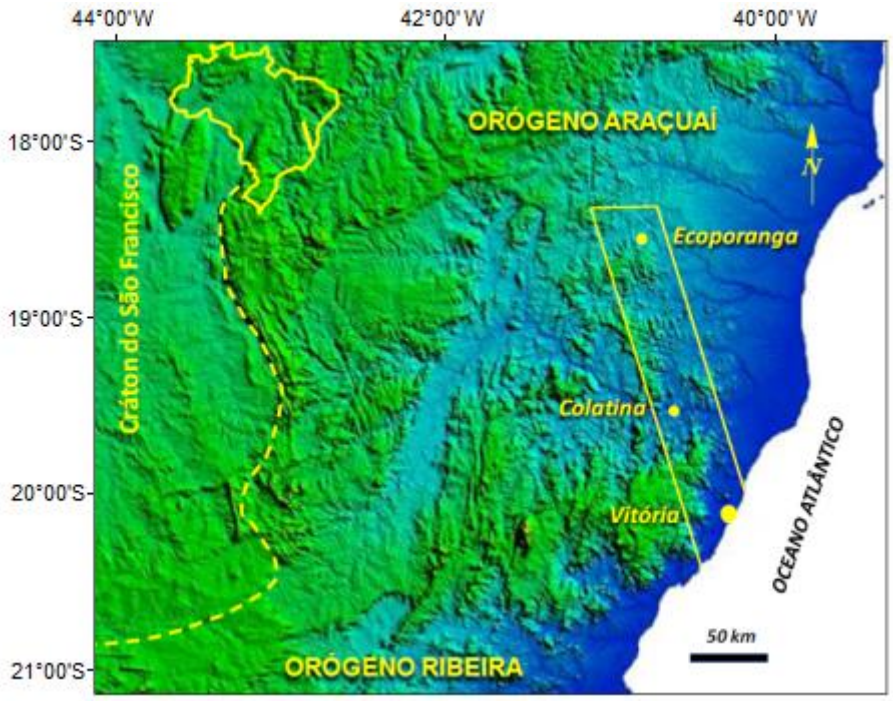


Figura 1.1: Localização do Feixe de Lineamentos Colatina. Modificado de Alkmim *et al.* 2013.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo precípuo deste trabalho consiste na caracterização da geometria 3D do enxame de diques básicos característico do Feixe de Lineamentos Colatina. Especificamente, com o emprego dos métodos geofísicos quantitativos e qualitativos. Procurou-se ainda:

i. Estimar a quantidade, distribuição espacial e volume dos diques do feixe;

ii. Investigar a continuidade longitudinal dos elementos do exame;

iii. Investigar sua possível conexão com um corpo máfico maior em profundidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

O Orógeno Araçuaí é uma das áreas orogênicas mais bem conhecidas do Brasil, com estudos marcantes como o de Almeida em 1977 e mais de 30 anos de pesquisas científicas e mapeamentos geológicos (Pedrosa-Soares *et al.* 2007). Embora exista um enorme acervo de trabalhos sobre a região, ainda são poucos aqueles com enfoque geofísico. Nesse contexto, espera-se que a caracterização morfológica e espacial em subsuperfície possa revelar informações significativas sobre a origem e possível correlação Feixe de Lineamentos Colatina com outras estruturas e enxames de diques brasileiros.

1.4 ESTRATÉGIA DE AÇÃO, MATERIAIS E MÉTODOS

O Feixe de Lineamentos Colatina localiza-se no estado do Espírito Santo em uma área de aproximadamente 30 km de largura e 250 km de comprimento, situada entre as cidades de Ecoporanga ao norte e Vitória ao sul (Figura 1.1). Esta área alonga-se na direção noroeste-sudeste e, geologicamente, faz parte dos domínios do Orógeno Araçuaí (Alkmim *et al.* 2013).

Para realização de estudo mais detalhado escolheu-se a região com maior concentração de diques, a qual se situa entre as cidades de Colatina e Vitória e está imediatamente a sul do Rio Doce (Figura 1.2). Seu acesso, a partir de Belo Horizonte, pode ser feito pela BR-381 até João Monlevade (MG) e em seguida pela BR-262 até a capital capixaba. Além disso, de modo a complementar o estudo local, foram realizadas análises em uma área mais abrangente, denominada “área de estudo regional”.

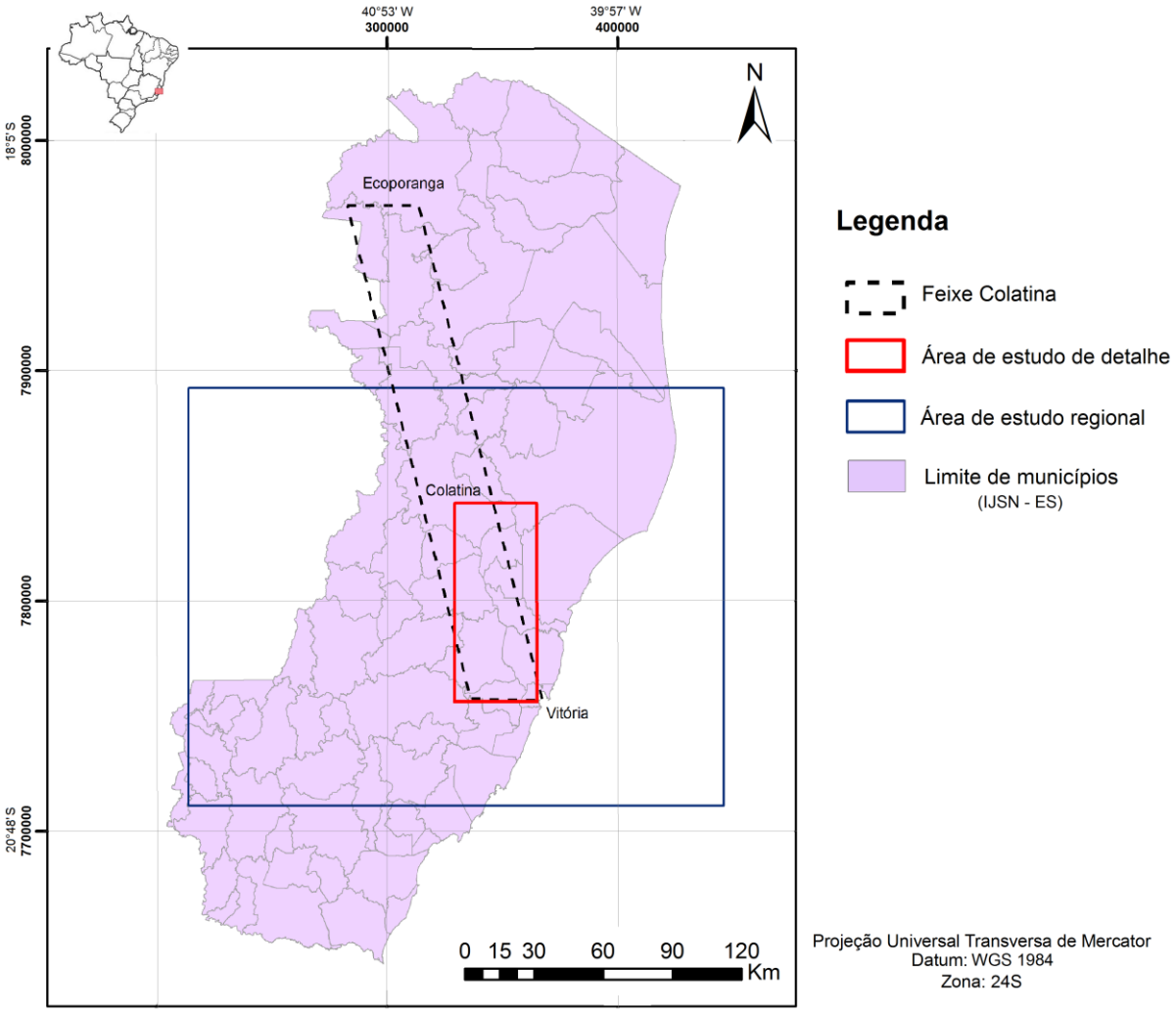


Figura 1.2: Localização da área de estudo de detalhe em relação à área de estudo regional e ao Feixe de Lineamentos Colatina.

A execução deste trabalho envolveu várias fases. Primeiramente foi feita uma pesquisa bibliográfica acerca dos dados existentes sobre o Feixe de Lineamentos Colatina e uma breve revisão sobre o Orógeno Araçuaí. Os mapas do projeto "Brasil ao milionésimo" da CPRM (folhas SE-42 e SF-24), o mapeamento realizado no projeto "O Feixe de Lineamentos Colatina" (Alkmim *et al.* 2013) e a tese de doutorado de Belém (2014) constituíram a base para descrição geológica.

Posteriormente, a partir dos dados geofísicos de aerolevantamento de magnetometria e radiometria realizados pela CODEMIG e fornecidos pela CPRM e, do levantamento gravimétrico da missão TOPEX/Poseidon (executada pela NASA e CNES) e disponibilizados pela *University of California San Diego,* foram gerados mapas utilizando o *software* Oasis

Montaj 7.0.1 (sistema Geosoft S.A.). Essa fase envolveu o processamento dos dados de gravimetria, magnetometria e radiometria para obtenção de mapas temáticos, cujo detalhamento encontra-se no Capítulo 3. A análise qualitativa dos feixes de lineamentos Colatina (Capítulo 4) foi feitas com auxílio do *software* ArgGIS 9.3.

Em seguida, com os *softwares* Euler 1.00, da *School of Geosciences – University of the Witwatersrand* e o ArcSCENE, foi feita a análise quantitativa (Capítulo 5) a partir do método de inversão (Deconvolução de Euler) - para permitir a visualização 2D em profundidade - e da interpolação dos perfis de inversão (*krigagem*), que permitiu a visualização em 3D da área de estudo.

Por conseguinte, a integração dos dados geofísicos e geológicos, também em ambiente SIG, encontra-se detalhada no Capítulo 6.

Ademais, os *softwares* Stereonet, PhotoFiltre e Paint foram utilizados para confecção de rosetas e edição de fotos e imagens, respectivamente.

A fase final consistiu na confecção desta monografia.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO DO FEIXE DE LINEAMENTOS COLATINA

2.1. INTRODUÇÃO

Apresentado na literatura como “Alinhamento Vitória-Ecoporanga” (Silva *et al.* 1987) e “Faixa Vitória-Colatina” (Novais *et al.* 2004), o Feixe de Lineamentos Colatina corresponde a uma feição morfoestrutural descrita inicialmente a partir de imagens aéreas. Belém (2014) utiliza ainda o termo “Feixe de Fraturas Colatina” ressaltando que “alinhamento” e “faixa” não seriam designações adequadas ao significado geológico da estrutura.

O Feixe de Lineamentos Colatina fica instalado nos domínios internos do Orógeno Araçuaí e está associado a um enxame de diques máficos pertencentes à Suíte Fundão (Silva *et al.* 1987), de orientação preferencial N15W (Roncato *et al*. 2011). Mello *et al.* (2005) ressaltam a influência dos lineamentos Colatina na drenagem da região, gerando anomalias e abruptas mudanças na direção do curso fluvial. Alkmim *et al.* (2006) citam a zona de cisalhamento rúptil Vitória-Colatina na evolução do Orógeno Araçuaí como um sistema de falhas com direcionamento NNW que corta todas as unidades anteriores a ela. Além disso, Lourenço 2015 destaca o limite entre as bacias de Campos e Espirito Santo dado pela junção entre os lineamentos Piúma e do feixe Colatina.

2.2 O ORÓGENO ARAÇUAÍ

Orógeno Araçuaí formou-se entre os períodos Ediacariano e Cambriano (Alkmim *et al.* 2006) e constitui-se pela Faixa de Dobramentos Araçuaí (Almeida 1977) e por um núcleo composto de rochas graníticas e de alto grau metamórfico (Pedrosa-Soares *et al*. 2007). Trata-se de uma região orogênica colisional que abrange desde o limite do Cráton São Francisco até a costa leste atlântica, entre os paralelos de 15° e 21°S (Pedrosa-Soares *et al.* 2007). O orógeno possui ainda continuidade no continente africano sendo chamado em sua integridade de “Orógeno Araçuaí Congo Ocidental” (Alkmim *et al*. 2006, 2013; Pedrosa-Soares *et al.* 2007) (Figura 2.1).

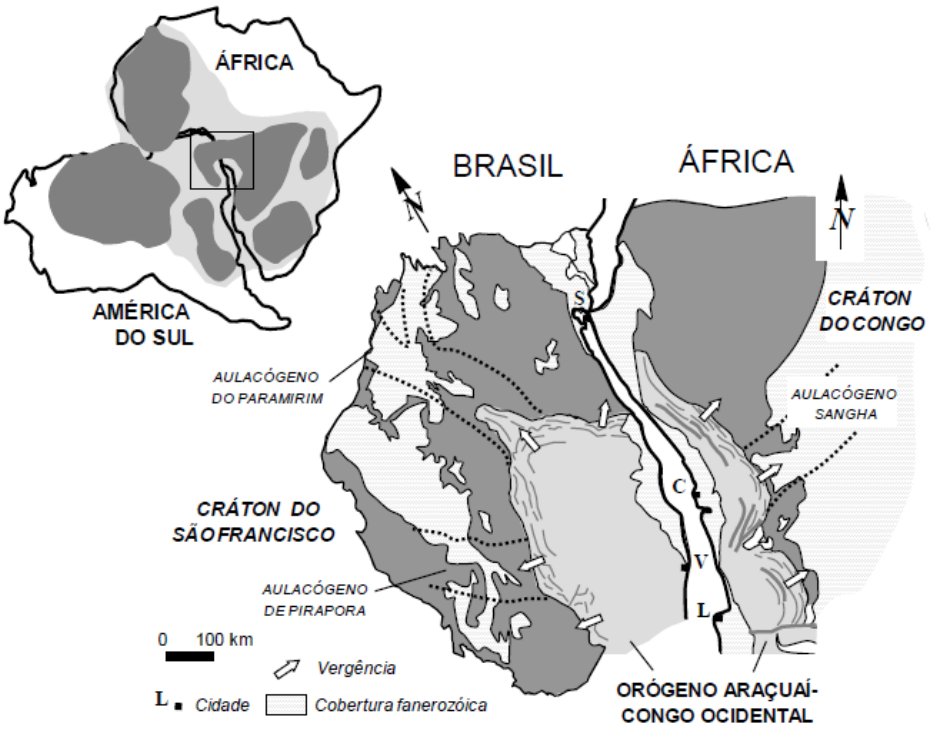


Figura 2.1: Localização do Orógeno Araçuaí Congo Ocidental com relação às porções brasileira e africana. Retirado de Alkmim *et al.* 2006.

A construção do Orógeno Araçuaí deu-se por uma sucessão de eventos que compreende: *i*) fechamento de uma bacia tipo Mar-Vermelho, a chamada Bacia Macaúbas, através da rotação do Cráton São Francisco em relação ao Cráton do Congo, consumo de um segmento oceânico e consequente geração de um arco magmático, o arco Rio Doce; *ii*) colisão das margens da Bacia Macaúbas, espessamento crustal e soerguimento orogênico; *iii*) colapso gravitacional e extenso magmatismo pós-cinemático (Alkmim *et al.* 2006, Pedrosa-Soares & Alkmim 2011). Para Pedrosa-Soares *et al.* (2001, 2007) esta história evolutiva teve lugar entre 630-490Ma, durante o ciclo Brasiliano, envolvendo expressivo magmatismo granítico em todos os seus estágios.

Dois grandes setores destacam-se no orógeno: a Faixa Araçuaí, que corresponde ao seu cinturão metamórfico externo e o núcleo cristalino, formado por rochas metassedimentares de alto grau e intrusões graníticas de várias gerações (Pedrosa-Soares *et al*. 2007, Alkmim *et al.* 2013). A Faixa Araçuaí, marcada por rochas metassedimentares, constitui dois terços do original Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental e possui grande variedade de feições geotectônicas do evento de abertura do oceano Atlântico, tais como unidades do

rifte continental, restos ofiolíticos, zona de sutura e arco-magmático e bacias relacionadas (Pedrosa-Soares *et al.* 2007). No núcleo cristalino (Figura 2.2), faixas miloníticas presentes em gnaisses possuem assembleia minerais formadas em condições metamórficas de pressão e temperatura máximas de aproximadamente 6.5 kbar e 820º C (Munha *et al.* 2005). Elas se alternam com paragêneses metamórficas de grau mais baixo. Além disso, nas regiões de magmatismo e plutonismo mais intensos é comum a ocorrência de auréolas de metamorfismo de contato (Alkmim *et al.* 2013).

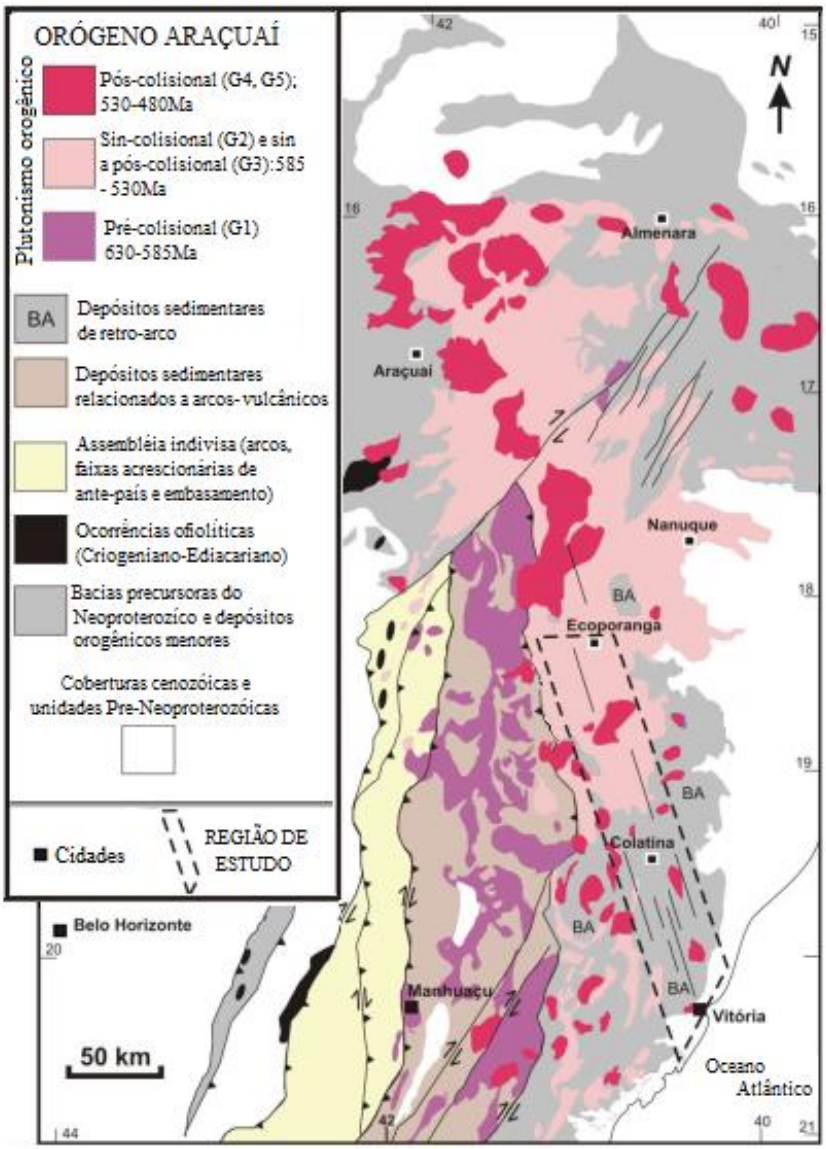


Figura 2.2: Mapa geológico-tectônico simplificado do núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí (modificado de Belém 2014).

2.3 GEOLOGIA DA REGIÃO AFETADA PELO FEIXE COLATINA

2.3.1 Estratigrafia

Um estudo realizado pela Universidade Federal de Ouro Preto em conjunto com a Universidade Federal de Minas Gerais, com incentivo da Rede de Estudos Tectônicos da Petrobrás, revelou que a área do Orógeno Araçuaí afetada pelo Feixe de Lineamentos Colatina caracteriza-se por cinco grandes unidades litoestratigráficas (Figuras 2.2 e 2.3):

i. Complexo Nova Venécia;

ii. Granitos da Supersuíte G2;

iii. Leucogranitos da Supersuíte G3;

iv. Granitos e charnockitos da Supersuíte G5;

v. Diques máficos da Suíte Fundão.

O Complexo Nova Venécia corresponde à unidade mais antiga da área, possui afloramentos em geral muito intemperizados e caracteriza-se por gnaisses de origem sedimentar. O complexo abrange a região central e sul do feixe (Figura 2.3). Os litotipos principais são biotita-granada-cordierita gnaisses (paragnaisses), cordierita granulitos e migmatitos. Estudos geocronológicos em zircões detríticos e monazitas metamórficas (Noce *et al.* 2004; Pedrosa-Soares *et al.* 2008, 2011) indicam idades entre 608 e 530 Ma. Os contatos com as demais unidades variam entre transicional (com a Supersuíte G2), difuso (com plútons da Supersuíte G5) e abrupto (também com plútons da Supersuíte G5, corpos pegmatíticos tardios e diques da Suíte Fundão).

A Supersuíte G2 é caracterizada por granitos do tipo S e divide-se, na área mapeada, em Suíte Ataléia e Suíte Carlos Chagas. A primeira está associada ao Complexo Nova Venécia, uma vez que os gnaisses desta vão transicionalmente, pelo processo de migmatização, se transformando nos granitóides da Suíte Ataléia. O principal litotipo é um granada-biotita-granito que ocupa principalmente a área sul e porções centrais do mapa. Já a Suíte Carlos Chagas caracteriza-se por um grande batólito que ocupa toda a porção norte e se estende muito além da área de estudo. Trata-se de um leucogranito, mais especificamente, um sienogranito (devido à abundância de cristais de feldspato potássico de grande tamanho). É

comum a intrusão de plútons da Supersuíte G5, gerando auréolas de metamorfismo de contato. O contato entre as duas Suítes (Ataléia e Carlos Chagas) é, por vezes, de natureza tectônica e delimitado por zonas de cisalhamento. Com relação às idades, o Granito Ataléia teve sua cristalização magmática em 591 Ma (método Pb-Pb em zircões por Noce *et al.* 2000) e o Granito Carlos Chagas teve idades sugeridas de 576 Ma pelo método U-Pb SHRIMP por Roncato *et al.* (2007) e Vauchez *et al.* (2007).

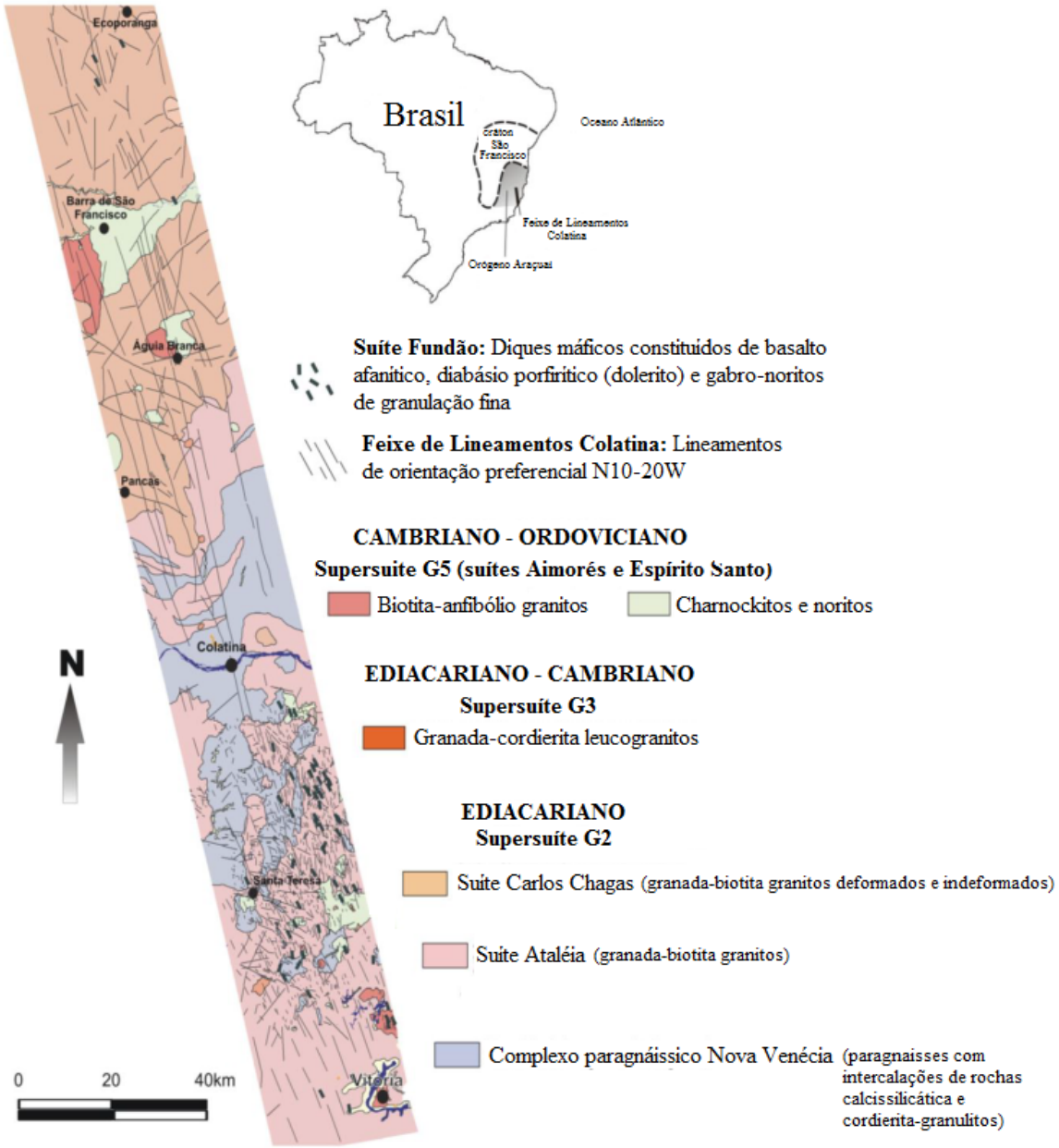


Figura 2.3: Mapa geológico do Feixe de Lineamentos Colatina (modificado de Belém 2014).

A Supersuíte G3 é composta por granada e cordierita leucogranitos, classificados a rigor como monzogranitos, e que ocorrem como "bolsões" na Suíte Ataléia e também no Complexo Nova Venécia. Datações U-Pb em zircão de Silva *et al.* (2002, 2005) indicam 540Ma. Diversos autores atribuem ainda a Supersuíte G3 como uma derivação da Supersuíte G2 gerada pela fusão parcial pós-cinemática da unidade anterior.

A Supersuíte G5 é constituída por plútons e representada na área pelas suítes Aimorés e Espírito Santo, localizadas na porção superior do mapa. São dois os litotipos predominantes: biotita granitos e charnockitos, entretanto também são encontrados granitos do tipo I. Tal unidade apresenta feições geomorfológicas plutônicas expressivas como o Monte Mestre Álvaro, próximo à cidade de Vitória. As idades para a suíte oscilam em torno de 510 Ma de acordo com autores variados.

Por fim, a Suíte Fundão abriga os diques máficos que por vezes preenchem as fraturas dos Lineamentos Colatina.

A grande maioria dos diques descritos em superfície por Alkmim *et al.* (2013) encontra-se na porção centro-sul do Feixe Colatina, região de estudo de detalhe do presente trabalho (Figura 2.4). Os diques são de composição máfica e podem ser classificados como basaltos ou ainda diabásio e gabronoritos de acordo com o aumento no tamanho de grãos em sua textura e origem plutônica, respectivamente. Além disso, são comuns pórfiros de olivina e cristais euédricos de magnetita. Os diques são verticalizados e regulares, possuindo, em geral, dimensão métrica, com cerca de 1,2 m de largura por 5 m de comprimento de extensão mínima e direcionamento preferencial NNW-SSE. Embora raros, foram descritos diques com dimensão de até 8,0 x 17,0 m e ainda a presença pequenos setores e deflexões com orientação NE-SW.

A geocronologia dos diques máficos da Suíte Fundão tem sido associada ao episódio de abertura do Oceano Atlântico (cerca de 140 Ma) por variados autores e métodos. No projeto RADAMBRASIL (1983) chegou-se à idade de 174 Ma para intrusões subparalelas à direção do Feixe Colatina pelo método de K-Ar, rocha total; Teixeira & Rodarte (2003) dataram os basaltos da Suíte Fundão em aproximadamente 127 Ma pelo método Ar-Ar em plagioclásio e cerca de 136 Ma pelo mesmo método em rocha total; e ainda, Valente *et. al.* (2009) destacaram que os diabásios da Suíte Fundão seriam pertencentes ao Cretáceo Inferior. Existem, no entanto, os estudos de Belém (2014) que, pelos métodos de U-Pb, chegou à

determinação de 500 Ma como idade para a Suíte Fundão, conflitando a ideia de que tais estruturas teriam se formado na abertura do Oceano Atlântico. Nas datações realizadas pela autora os métodos de Ar-Ar e U-Pb apresentaram dois conjuntos de idade muito distintos, compreendendo os períodos Cretáceo-Jurássico e Cambriano-Ordoviciano, respectivamente. Belém (2014) sugere que análises pelo método Ar-Ar seriam influenciadas por eventos térmicos subsequentes e defende que a datação radiométrica pelo método U-Pb em zircão e titanita é a mais confiável para obtenção de idade de cristalização em rochas magmáticas. Vale lembrar, contudo, que as rochas formadoras da Suíte Fundão não são, tipicamente, ricas em zircões, sendo a maior parte deles herdados de rochas hospedeiras, teoricamente, mais antigas.

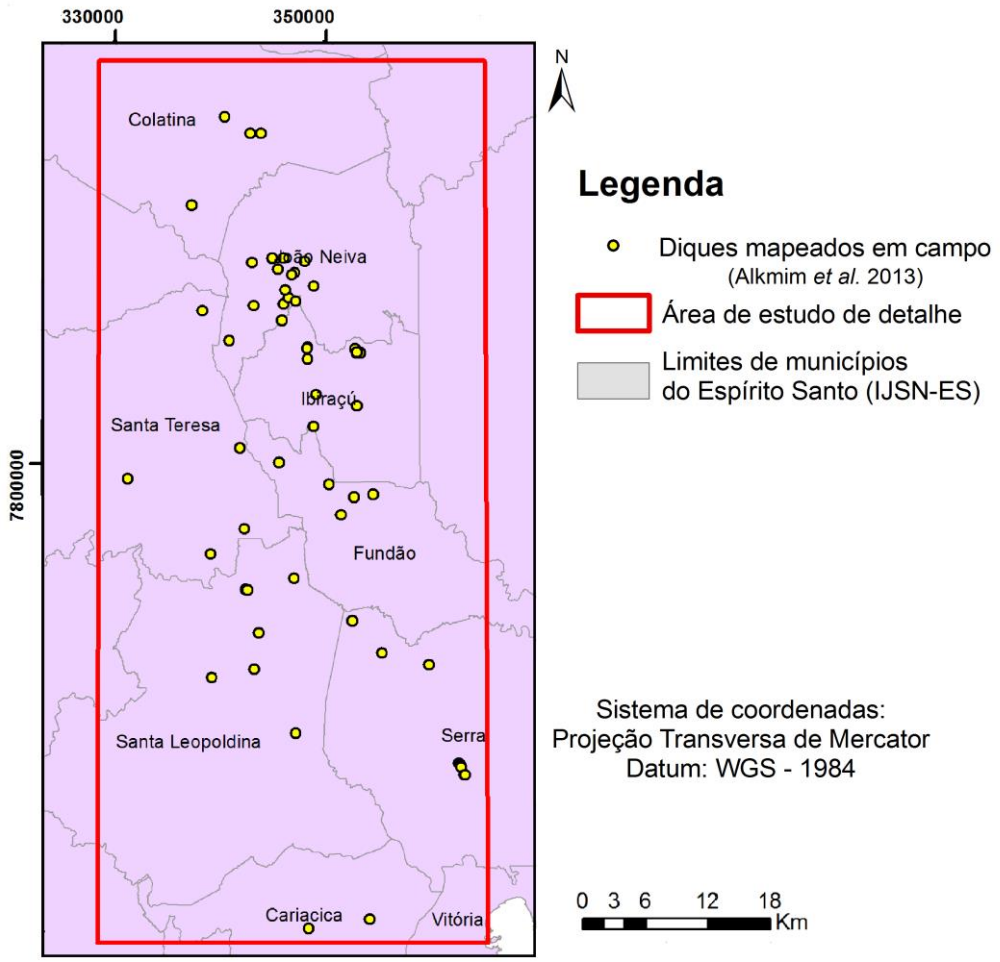


Figura 2.4: Localização da área de estudo de detalhe e dos diques aflorantes da Suíte Fundão mapeados por Alkmim *et al*. 2013.

2.3.2 Geologia Estrutural e Geotectônica

O Feixe de Lineamentos Colatina encontra-se no núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí, região que foi submetida a um expressivo magmatismo granítico ao longo de sua história evolutiva (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007).

De acordo com Uhlein *et al.* (2014) a geologia estrutural da região da área de estudo caracteriza-se por tramas gnáissicas, foliação regional, zonas de cisalhamento, dobras, estruturas migmatíticas e registros de fluxo ígneo. Os autores defendem ainda duas fases de deformação D1 e D2, sendo a primeira a fase tectônica principal e formadora do Orógeno Araçuaí e, a segunda, àquela formadora das dobras antiformais e sinformais abertas de grande porte e deformadora da foliação dúctil gerada pela primeira fase. Na região propriamente do Feixe Colatina são marcantes dois tipos de estrutura: (i) estruturas dúcteis em gnaisses e granitóides e (ii) várias famílias de fraturas que constituem os lineamentos (Alkmim *et al.* 2013).

Em termos de eventos geotectônicos e ordem de formação tem-se o embasamento (Complexo Nova Venécia) e litologias sin-colisionais (Supersuíte G2), tardi-colisionais (Supersuíte G3) e pós-colisionais (Supersuíte G5), além das intrusões tardias (Suíte Fundão) (Alkmim *et al.* 2013). A seguir, são apresentadas as principais características estruturais observadas nas unidades estratigráficas descritas no item anterior com enfoque na Suíte Fundão.

Complexo Nova Venécia: bandamento composicional (Alkmim *et al.* 2013) e foliação regional dos paragnaisses marcada por granitos foliados ou não, deformados da Supersuíte G2 (Vauchez *et al.* 2007, Roncato 2009, Silva *et al.* 2011 e Gradim *et al*. 2014 *in* Belém 2014). Raro bandamento e presença de foliação nos cordierita granulitos e, nos migmatitos, tem-se foliação e estrutura migmatítica predominantemente estromática (Alkmim *et al.* 2013).

Supersuíte G2: rochas graníticas (Suítes Ataléia e Carlos Chagas) apresentam foliação herdada da intensa foliação colisional (Belém 2014). Os granitos da Suíte Ataléia associam-se ao Complexo Nova Venécia pelo processo de migmatização e a Suíte Carlos Chagas apresenta ainda estruturas típicas de fluxo ígneo (trama decussada) e zonas de cisalhamento dúcteis marcadas por milonitos (Alkmim *et al.* 2013).

Supersuíte G3: Ocorre como bolsões no Complexo Nova Venécia e na Supersuíte G2 e é desprovida de foliação regional, embora possua xenólitos e restitos com foliação reliquiar (Alkmim *et al.* 2013).

Supersuíte G5: Plútons não apresentam a foliação regional, mas podem conter foliação de borda originada durante o processo intrusivo, bem como características estruturais de suas encaixantes (Belém 2014). Além disso, foram observadas foliações e lineações de fluxo ígneo (Alkmim *et al.* 2013).

Suíte Fundão: Corpos alongados de direcionamento preferencial NNW-SSE e com pequenos setores e deflexões com orientação NE-SW. Estas rochas intrudem todas as unidades citadas anteriormente em contato abrupto ao longo de planos de fratura, no entanto, as rochas encaixantes não apresentam mudança na atitude de sua foliação nas proximidades das intrusões, mostrando pouca interferência dos diques em sua estruturação dúctil (Alkmim *et al.* 2013).

A evolução geotectônica das unidades está associada ao evento Brasiliano e à formação do Orógeno Araçuaí. Basicamente, os paragnaisses do Complexo Nova Venécia são a litologia mais antiga e, devido à deformação compressiva regional, sua fusão (e refusão dos granitos da Supersuíte G2) levaram à geração dos granitos peraluminosos, tipo S, das supersuítes G2 e G3 (Gradim *et al*. 2014). Já a Supersuíte G5 é fruto de plutonismo pós-colisional (Pedrosa-Soares *et al.* 2011), compõe-se de intrusões hospedadas nas três unidades anteriores e estaria relacionada ao colapso extensional do Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000, Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2005, Wiedemann *et al.* 2002, Campos *et al.* 2004, Martins *et al*. 2004, Mendes *et al.* 2005, Silva *et al.* 2005, Alkmim *et al.* 2006, Marshak *et al.* 2006 *in* Belém 2014). Por fim, O Feixe de Lineamentos Colatina teria se formado em regime distensivo e, provavelmente, foi reativado posteriormente em regime transcorrente (Alkmim *et al*. 2013), durante o processo extensional de rifteamento na abertura do Oceano Atlântico (Alkmim *et al.* 2006). Assim, os diques máficos da Suíte Fundão preenchem alguns destes lineamentos e intrudem todas as unidades anteriores.

2.4 ASPECTOS MORFOLÓGICOS DA REGIÃO DO FEIXE

2.4.1 Geomorfologia

De acordo com o Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN – ES) o estado do Espírito Santo divide-se, basicamente, em três grandes morfoestruturas: (i) depósitos sedimentares, (ii) faixas de dobramentos remobilizados e (iii) maciços plutônicos, além de áreas de acumulação fluvial e corpos d'água (Figura 2.5).

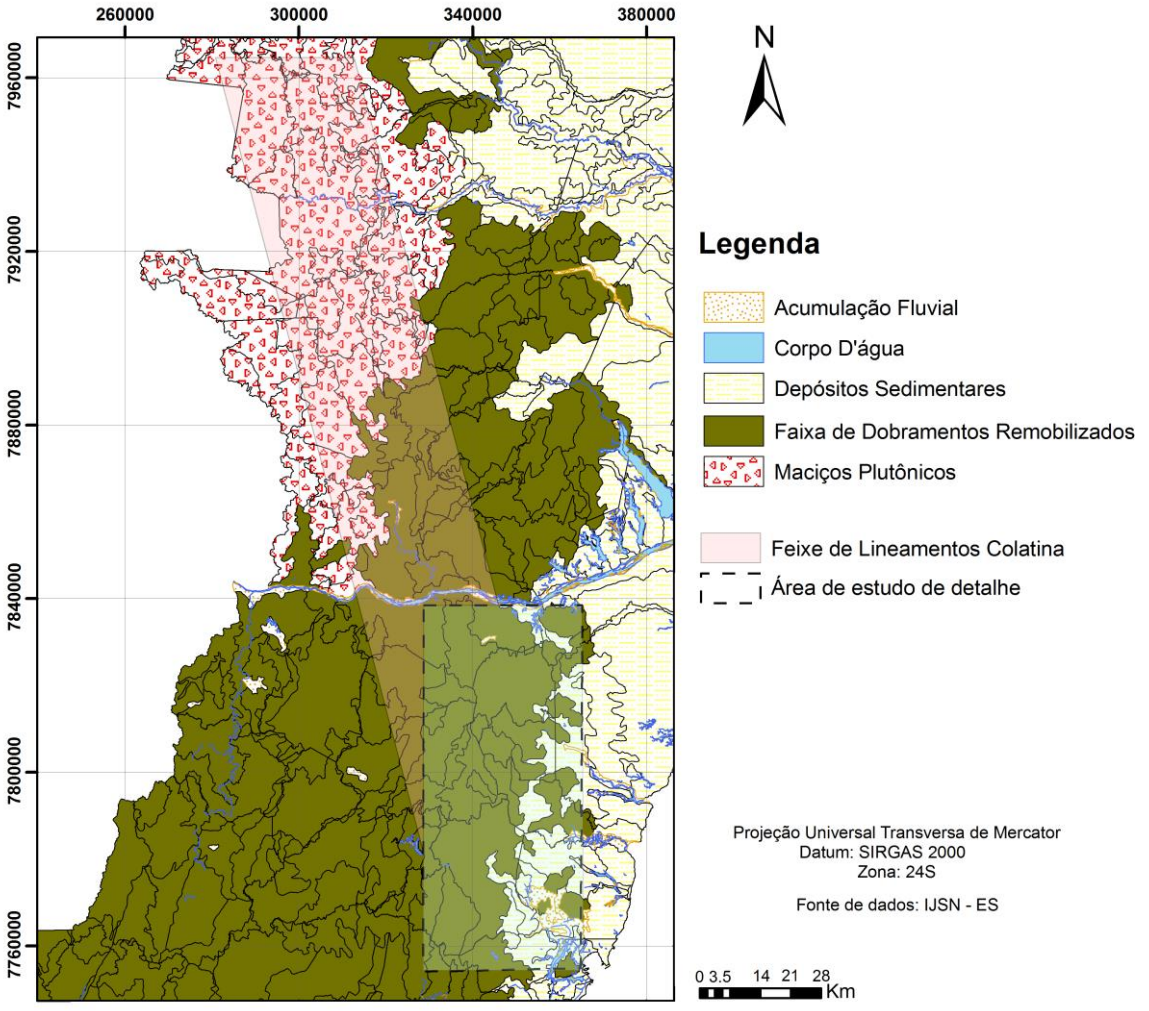


Figura 2.5: Morfoestruturas da região do Feixe de Lineamentos Colatina e da área de estudo. Fonte de dados: Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN-ES).

As morfoestruturas descritas anteriormente definem as unidades representas na Figura 2.6.

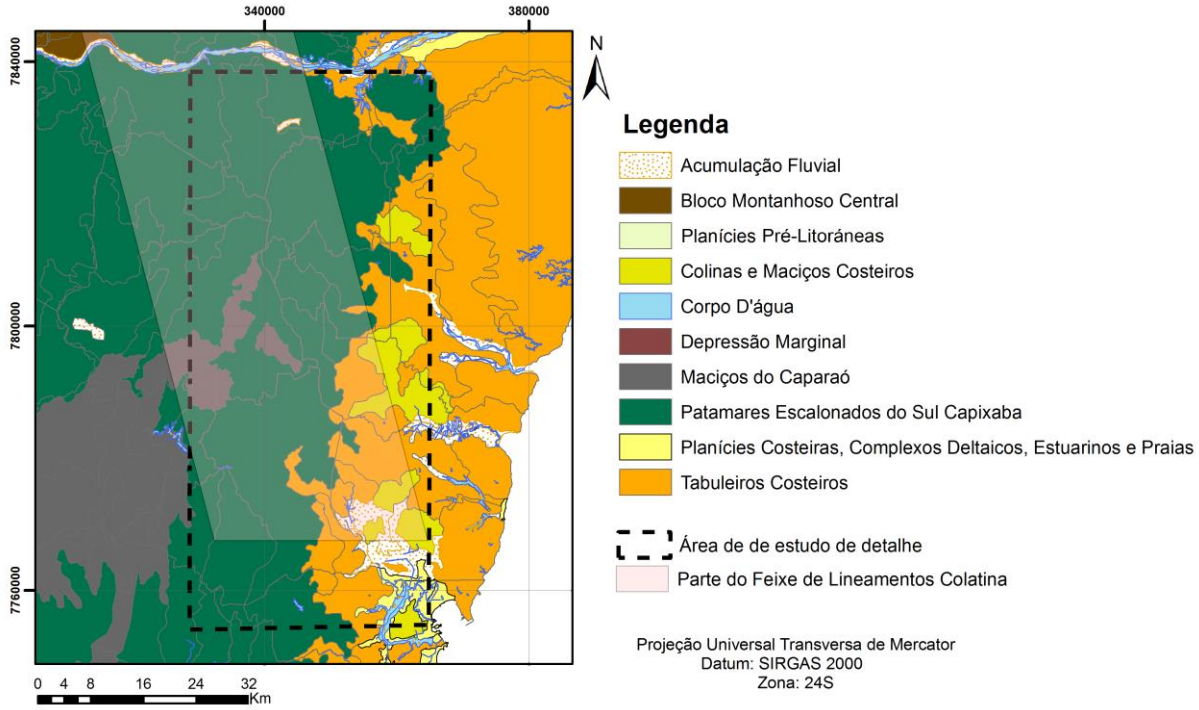


Figura 2.6: Unidades geomorfológicas da região do Feixe de Lineamentos Colatina com enfoque na área de estudo. Fonte de dados: Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN-ES).

Compilando as informações presentes nas figuras citadas anteriormente e com base descrição geomorfológica de Alkmim *et al.* (2013), a região do Feixe de Lineamentos Colatina e a área de estudo detalhado do presente trabalho podem ser agrupadas nos seguintes domínios geomorfológicos:

i. Planícies costeiras com altitudes até 100m e dominada por depósitos sedimentares, envolvendo complexos deltaicos, estuarinos e praias. Localizam-se na região sudeste da área de estudo;

ii. Planaltos com altitudes variando de 300 a 500 m e relevo acidentado em alguns locais com *inselbergs* (podendo atingir cotas de até 800 m), compreendendo a porção central do estado e compostos por faixas de dobramentos remobilizados, maciços plutônicos e depósitos sedimentares. Engloba os patamares escalonados do sul capixaba e tabuleiros, colinas e maciços costeiros;

iii. Província de Pães de Açúcar de Pancas com feições isoladas e fortemente controladas pelos lineamentos de direção NNW, podendo atingir cotas de até 900m. É formada por maciços plutônicos e faz parte do bloco montanhoso central;

iv. Região serrana de relevo bastante acidentado, na porção oeste e em outras ocorrências ao longo do estado, com altitudes médias de 700 m a 1000 m e chegando a 2890 no Pico da Bandeira. Composto por faixas de dobramentos remobilizados e maciços plutônicos. Abrange os domínios serranos de Santa Teresa e Ecoporanga e está representado no mapa (Figura 1.4) pelo bloco montanhoso central, maciços do Caparaó e depressão marginal;

v. Planícies aluviais ao longo das drenagens com elevações de 100 a 400 m, áreas de acumulação fluvial. A principal drenagem é o rio Doce, que corta todo o estado se encontra ao norte da área de estudo, passando pelo município de Colatina.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.1 INTRODUÇÃO

A geofísica é uma ciência que obtém respostas a partir do contraste de propriedades físicas das rochas, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Cada método geofísico é sensível a uma determinada propriedade física (Tabela 3.1) e, devido à ambiguidade e incertezas que são inerentes aos métodos, são necessários tratamentos e correções para minimizar tais efeitos.

Tabela 3.1- Relação entre propriedade física e método geofísico associado. Fonte: Adaptado de Telford *et al.* 1990.

Propriedade física	Método geofísico
Densidade	Gravimetria
Susceptibilidade magnética	Magnetometria
Condutividade Elétrica	Métodos elétricos ou eletromagnéticos
Radioatividade	Radiometria
Elasticidade	Sísmica
Condutividade térmica	Termometria
Luminescência	Método da luminescência

Neste capítulo serão definidos os métodos geofísicos utilizados, no presente trabalho, para a avaliação qualitativa e quantitativa dos diques do Feixe Colatina, a saber: métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) e radiometria.

3.2 MÉTODOS POTENCIAIS

3.2.1 Gravimetria

A gravimetria envolve medidas de variação do campo gravitacional da Terra (Telford *et al.* 1990) geradas a partir de diferenças de densidade entre as rochas em subsuperfície (Kearey *et al.* 2009). Apesar da gravidade só começar a ser utilizada para prospecções geofísicas no início do século XX, as primeiras observações sobre este fenômeno foram registradas por Aristóteles em 300 a.C.. Posteriormente, Galileu Galilei descreveu o movimento de queda livre no início do século XVII e Newton postulou a Lei da Gravitação em 1687, também conhecida como Segunda Lei.

A gravimetria tem suas bases na Lei da Gravitação Universal de Newton que relaciona a força gravitacional entre dois corpos como função do produto entre as massas dos corpos dividido pelo quadrado da distância entre eles.

$$F = \frac{GM}{R^2}m = mg \qquad \text{Equação 3.1}$$

Onde: F é a força da gravidade; G, constante gravitacional ($6{,}67 \times 10^{-11}$ $m^3 kg^{-1} s^{-2}$); M e m, massas dos corpos de estudo (com $M >> m$); R, raio da distância entre os corpos e g, aceleração gravitacional.

A partir do conceito de força gravitacional, chega-se ao conceito de aceleração da gravidade (g), sabendo que a aceleração é a força dividida pela massa. Em termos convencionais, utiliza-se, atualmente, a aceleração gravitacional da Terra como *"g"* igual a 9,81 m/s². Tem-se ainda, por definição, que o peso de um corpo é o produto entre a massa do corpo e a aceleração da gravidade (mg).

$$g = \frac{GM}{R^2} \qquad \text{Equação 3.2}$$

Pensando no planeta Terra como uma esfera, era de se esperar que o valor da gravidade fosse constante em todos os pontos, entretanto, o planeta possui a forma de um elipsoide e outros fatores como rotação, superfície irregular e distribuição interna de massa fazem com que a gravidade seja variável ao longo da superfície terrestre (Kearey *et al.* 2009). Por conseguinte, utiliza-se o conceito de potencial gravitacional (U) para definir, em termos de energia, essa variação da gravidade, sendo M e r, respectivamente, massa e raio da Terra.

$$U = \frac{GM}{r} \qquad \text{Equação 3.3}$$

A primeira derivada de U em qualquer direção define a componente da gravidade naquela direção e, superfícies com o mesmo valor de U são chamadas equipotenciais (Kearey *et al.* 2009). Tem-se o esferoide de referência da Terra que é definido por medidas geodésicas e rotas de satélite e apresenta-se abaulado no equador e achatado nos polos. Este se aproxima

do geoide, que é definido pela equipotencial de U no nível dos mares somada a efeitos de força centrífuga (Telford *et al.*1990) (Figura 3.1).

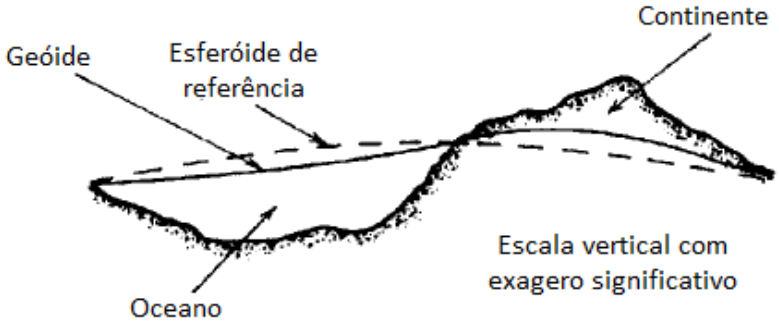


Figura 3.1: Comparação entre o esferoide de referência da Terra e o geoide de acordo com variações laterais de densidade. Adaptado de Telford *et al.* 1990.

Ainda segundo Telford *et al.* (1990), o geoide e o esferoide de referência não coincidem devido a variações laterais de densidade. Tais variações de densidade dos corpos terrestres (Tabela 3.2) geram perturbações e anomalias locais no campo gravitacional da Terra. Basicamente, as anomalias gravimétricas podem ser explicadas como a diferença entre a gravidade medida e a gravidade do geoide de referência (Figura 3.2).

Tabela 3.2- Exemplos de variação de densidade entre rochas. Fonte: Adaptado de Telford *et al.* 1990.

	Rochas	**Variação da densidade (g/cm³)**
Sedimentares	Arenito	1,61-2,76
	Folhelho	1,77-3,20
	Calcário	1,93-2,90
	Dolomito	2,28-2,90
Ígneas	Basalto	2,70-3,30
	Andesito	2,40-2,80
	Riolito	2,35-2,70
	Granito	2,50-2,81
Metamórficas	Quartzito	2,50-2,70
	Anfibolito	2,90-3,04
	Gnaisse	2,59-3,00
	Eclogito	3,20-3,54

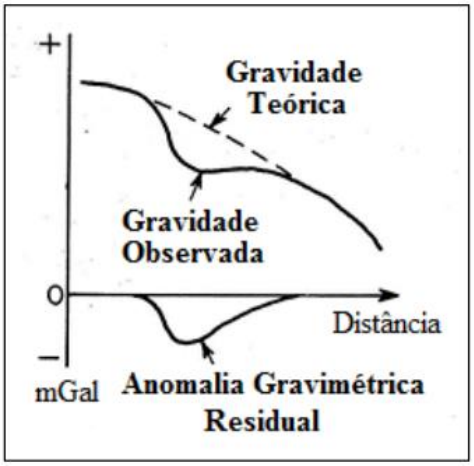


Figura3.2: Anomalia gravimétrica residual de acordo com a variação entre as densidades teórica e medida. Extraído de Silva (2015), modificado de Kearey *et al*. 2009.

A gravimetria mede justamente as anomalias gravimétricas e, através de seus dados, são possíveis deduções sobre as rochas em subsuperfície (Kearey *et al.* 2009).

Vale ressaltar que as variações de gravidade devido às variações de densidade são da ordem de 100 μms^{-2}, sendo a unidade *micrômetros por segundo ao quadrado* chamada unidade de gravidade (*gu*) (Kearey *et al.* 2009). A unidade internacional C.G.S. (centímetro-grama-segundo) de medida de gravidade é o miligal e 1 mGal = 10^{-3} cms^{-2}=10 gu.

De acordo com Telford *et al.* (1990), a gravidade depende de cinco fatores:

i. Latitude;

ii. Elevação;

iii. Topografia do terreno ao redor;

iv. Correntes marítimas;

v. Variações de densidade em subsuperfície (heterogeneidades).

Este último fator - o mais importante para a investigação em subsuperfície- possui anomalias muito pequenas quando comparadas às de latitude e elevação e, em geral, anomalias maiores que as variações medidas por conta de correntes e de topografia (Telford *et al.* 1990). Deste modo, para se obter apenas o valor das anomalias de contraste de densidade em subsuperfície, faz-se a redução da gravidade medida ao elipsoide de referência através de

correções gravimétricas. Os tipos de correções, bem como suas definições e fórmulas de aplicação são mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Correções gravimétricas.

Correções	Definição	Equação / Aplicação
Gravimétrica	Redução da gravidade ao nível do mar que corresponde à superfície do geoide.	$g_h = g - 0{,}3086\,h$ g_h = gravidade teórica; h =altitude para qualquer gh; g=gravidade de referência
Deriva (ou *drift*)	Remoção de variações do gravímetro provocadas por falhas mecânicas do equipamento inerentes as variações de temperatura. (C_D)	A correção do *drift* é realizada extraindo (em módulo) a variação linear de cada ponto amostrado, a partir de um longo período amostral sucessivo (10 a 12 horas).
Latitude	Correção da variação de densidade em função da latitude provocada pelo formato não esférico da Terra. Utilizada quando o levantamento abrange duas ou mais latitudes. (C_θ ou C_L)	$C_L = g_1 - g_o \approx 5162{,}83\ sen2\phi_1 - sen2\phi_o)$ g_1 e ϕ_1= gravidade e latitude de um ponto g_o e ϕ_o= gravidade e latitude de referência
Elevação	Free-air: Correção da diminuição da gravidade ao longo que o aparelho se afasta do centro da Terra. Ajusta a diferença de altitude entre as medidas e o geoide. (C_{FA}) Bouger: Correção do efeito gravitacional provocado pelas rochas entre o ponto de observação e o *datum*. Corrige o excesso ou falta de massa entre a superfície real e a superfície de referência. (C_B) Terreno: utilizada após a correção de Bouger para repor o relevo topográfico nas proximidades da estação gravimétrica. (C_T)	$C_{FA} = \Delta_g = \lvert g - g_h \rvert \approx GM/r^3 = 0{,}3086h$ g=gravidade de referência; gh= gravidade teórica; h=altitude $CB = 2\,\pi\,G\,\rho\,h = 0{,}1119h$ h=altitude ortométrica da estação; ρ=densidade do pacote rochoso A CT é feita a partir de modelos digitais de terreno que calculam pontualmente a gravidade de cada coordenada.
Correntes de maré	Remoção da variação periódica causada pelos efeitos gravitacionais de atração do Sol e da Lua conforme sua posição em relação à Terra. (C_M)	Variações previsíveis na aceleração gravitacional de até 0,3mgal.
Eotvos	Correção dos efeitos da aceleração centrípeta quando o levantamento gravimétrico é feito em veículos em movimento. (C_E)	$C_E = 75{,}03\ v\ sen\alpha\ cos\phi + 0{,}04154\ v^2$ v = velocidade do veículo (em nós); α = direção azimutal e ϕ=latitude

A fórmula Internacional da Gravidade (IGSN-71 - *International Gravity Standardization Net)*, definida a partir do esferoide de referência da Terra, é dada por:

$$g = g_0\,(1 + 0{,}0053024.\,sen^2\Phi + 0{,}00000587.\,sen^2\Phi)gal \qquad \text{Equação 3.4}$$

Onde, g é a gravidade na posição, g_0, gravidade no equador (=978,03185 gal) e Φ, latitude.

A partir daí, a anomalia gravimétrica (Δg) é definida a partir da gravidade observada (g_{obs}), da gravidade do esferoide de referência para o local (g_{ref}) e pelas correções ($corr$) realizadas.

$$\Delta g = g_{obs} - g_{ref} + \Sigma corr \qquad \text{Equação 3.5}$$

Anomalia Free Air

A anomalia Free Air, na qual se analisa a variação da distância entre os pontos de medição e o centro da Terra, é obtida a partir das correções ($\Sigma corr$) citadas na Tabela 3.3. A equação que define a correção de Free Air (C_{FA}) é mostrada abaixo, com a altura (h) definida em metros:

$$C_{FA} = 0{,}3086h \qquad \text{Equação 3.6}$$

E, sendo $\Sigma corr_1$ o somatório de todas as correções específicas do levantamento, exceto a correção de Bouguer, tem-se:

$$\Sigma corr_1 = C_{FA} + C_\theta + C_D + C_M + C_E \qquad \text{Equação 3.7}$$

Para se encontrar a anomalia Free Air (Δg_{FA}) basta subtrair do valor medido em campo (g_{obs}) corrigido o valor de gravidade teórico (g_{ref}) para aquela latitude. Assim:

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} + \Sigma corr_1 - g_{ref} \qquad \text{Equação 3.8}$$

Anomalia Bouger

Já a anomalia Bouger (Δg_B) é obtida a partir da correção Bouger (C_B) que se relaciona aos dados da anomalia Free-Air (equação 3.8). Neste caso considera-se o volume de rocha existente entre o ponto de observação e o *datum* (Kearey *et al.* 2009), removendo o efeito da topografia através da compensação a partir da densidade médias das rochas (Equações 3.9 e 3.10).

$$C_B = 0{,}04185\Delta\rho h \qquad \text{Equação 3.9}$$

Com a altitude (h) expressa em metros e $\Delta\rho$ como o contraste de densidade entre as rochas. Para o cálculo de contraste de densidade no continente ($\Delta\rho = \rho_{ar} - \rho_{rocha}$) considera-se a densidade do ρ_{ar} 0 g/cm³ e a ρ_{rocha}=2,6 g/cm³.

$$\Delta g_B = C_B + \Delta g_{FA} \qquad \text{Equação 3.10}$$

3.2.2 Magnetometria

A magnetometria propõe a investigação da subsuperfície a partir de anomalias do campo magnético terrestre geradas pelas propriedades magnéticas das rochas (Kearey *et al.* 2009). Materiais magnéticos são historicamente utilizados pelo homem desde 200a.C. quando os chineses inventaram instrumentos semelhantes às bússolas. Em 1600, William Gilbert descreveu o campo magnético terrestre em seu livro "De Magnete". Já no século XIX, Gauss demonstrou matematicamente que o campo magnético é quase todo gerado no interior da Terra e Oesterd descobriu a relação entre fenômenos elétricos e magnéticos. O uso da magnetometria para prospecções geofísicas, entretanto, se iniciou no século XX e, hoje, trata-se de uma das técnicas mais favoráveis para prospecção de minérios em subsuperfície e de estruturas associadas a depósitos de óleo e gás, devido ao seu relativo baixo custo e pouca necessidade de correção de dados.

O campo magnético interno da Terra possui caráter dipolar e as linhas de força comportam-se como se houvesse uma imensa barra imantada no centro da Terra com inclinação de 11º (declinação magnética: ângulo entre o norte geográfico e norte magnético) (Press *et al*. 2006). Nesse campo, as linhas de força saem do polo sul magnético e entram no polo norte magnético (Figura 3.3).

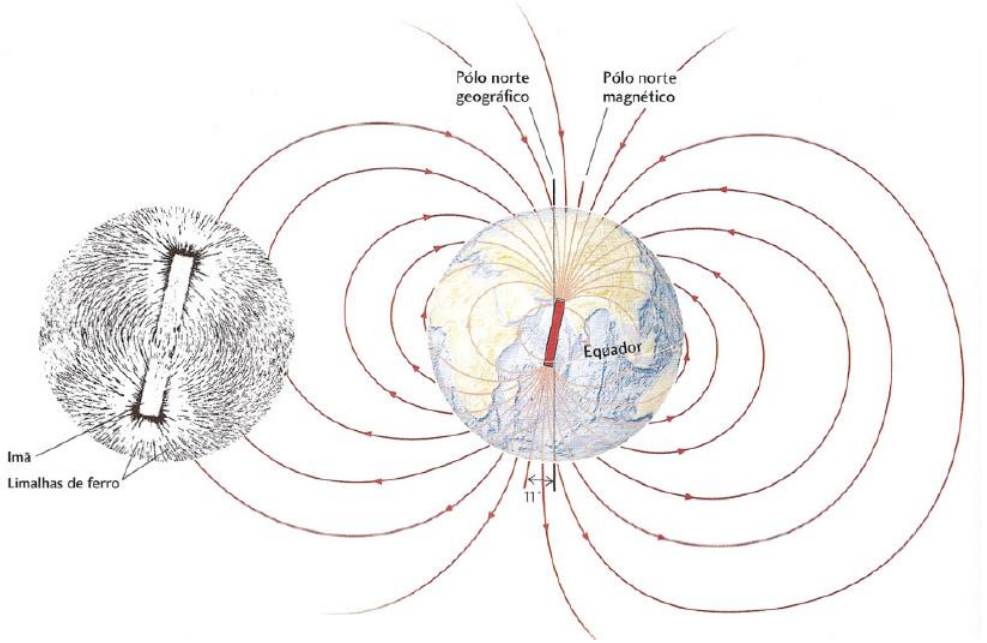


Figura 3.3: Representação do campo magnético da Terra e da orientação da limalha de ferro por uma barra imantada. Adaptado de Press *et al.* (2006).

O modelo mais aceito para o fenômeno de magnetismo terrestre é a teoria do geodínamo na qual, basicamente, o campo magnético terrestre seria induzido a partir da formação de correntes elétricas geradas por correntes de convecção do núcleo externo da Terra (Press *et al.* 2006).

O campo magnético terrestre é composto basicamente por:

i. Campo principal (interno);

ii. Campo externo;

iii. Variações no campo principal.

O primeiro é derivado da estrutura interna da Terra e é responsável quase que pela totalidade do campo magnético terrestre. O segundo, por sua vez, decorre de eventos externos como tempestades solares e corresponde a pequena parte do campo magnético total. Já o terceiro dá origem às anomalias magnéticas que são uma consequência da distribuição irregular de rochas magnetizadas em subsuperfície, estas possuem variações relativamente constantes no tempo e no espaço, sendo o foco para prospecções geofísicas. As variações no conteúdo mineral magnético das rochas próximas à superfície podem ser amplas o suficiente para causar uma duplicação no campo magnético local (Telford *et al.* 1990).

Ainda que o campo magnético externo corresponda a apenas 1% do campo magnético total (Telford *et al.* 1990) gases ionizados no plasma geram tempestades magnéticas e erupções solares geram alterações significativas na intensidade do campo total. As erupções solares aliadas à rotação da Terra geram o fenômeno da variação diurna, no qual o ápice da intensidade do campo magnético ocorre ao meio-dia e é descrito como o topo de uma gaussiana (Kearey *et al.* 2009).

Existem dois tipos de magnetização aos quais as rochas podem estar sujeitas. Chama-se de *magnetização induzida* àquela adquirida ao longo da história geológica da rocha e de *magnetização remanescente* aquela gerada pelo campo magnético dominante no período de formação da rocha. Dessa forma, o valor medido de magnetização da rocha é a resultante entre os dois tipos citados acima.

A propriedade de magnetização das rochas é chamada "susceptibilidade magnética" (Figura 3.4). De acordo com sua intensidade e com sentido de magnetização (relacionado ao *spin* dos elétrons nos átomos), os materiais dividem-se em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (Kearey *et al.* 2009). Minerais e rochas diamagnéticos como quartzo, grafita e mármore possuem baixa susceptibilidade magnética e sentido de magnetização contrário ao do campo eletromagnético atuante no momento da magnetização. Os paramagnéticos (pirita, biotita e gnaisse, entre outros) também possuem fraca magnetização, contudo, esta se dá no mesmo sentido do campo. E os materiais ferromagnéticos têm alta susceptibilidade magnética, adquirindo um forte magnetismo na direção do campo, sendo os minerais mais comuns magnetita, hematita e pirrotita.

Rochas ferromagnéticas podem perder seu magnetismo tornando-se rochas paramagnéticas à medida que vão sendo submetidas a profundidades e temperaturas mais altas. A temperatura limite abaixo da qual uma rocha mantém sua imantação é chamada "temperatura de Curie". Para a magnetita esta temperatura é de 578° C (Kearey *et al.* 2009).

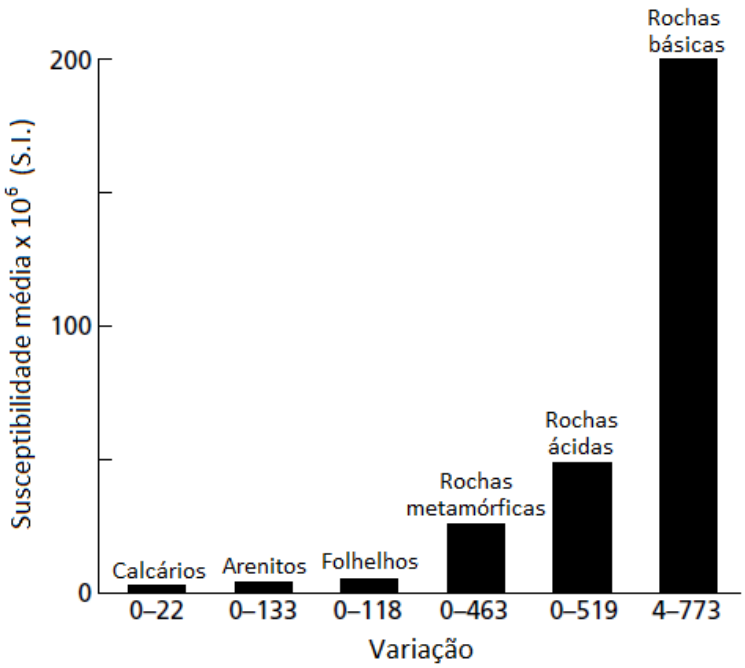


Figura 3.4: Histograma mostrando a variação da susceptibilidade magnética nos principais tipos de rocha. Modificado de Kearey *et al*. (2009).

Como pode ser visto no histograma da Figura 3.4 as rochas ígneas e metamórficas possuem susceptibilidade magnética muito maior que a das rochas sedimentares. Assim, a magnetometria pode ser utilizada para mapear feições como embasamento, intrusões e extrusões básicas recobertas por sedimentos e/ou rochas sedimentares sem que as anomalias magnéticas das rochas alvo sejam influenciadas pela cobertura (Kearey *et al.* 2009).

Assim como a gravimetria utiliza um campo de referência, a magnetometria também o faz. É chamado de Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF- *International Geomagnetic Reference Field*) o campo magnético teórico na superfície terrestre. Como este varia ao longo do tempo, o mesmo é atualizado a cada cinco anos pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (Kearey *et al.* 2009).

A análise de dados magnetométricos exige certo conhecimento da área, uma vez que dois corpos com tamanhos e profundidades diferentes podem gerar uma mesma resposta magnética. Além disso, o campo magnético possui caráter dipolar dificultando ainda mais a interpretação das anomalias. De modo a tratar os dados magnetométricos são feitas, basicamente, duas correções: variação diurna e remoção do IGRF (Tabela 3.4). Após a remoção destes dois efeitos é possível a obtenção do campo anômalo. Ainda, para facilitar a

interpretação dos dados dipolares costuma-se fazer a transformação para uma anomalia monopolar, chamada de Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

Tabela 3.4- Correções magnetométricas.

Correções	Função
Variação diurna	Remoção da variação diurna através do seu monitoramento constante ou em intervalos de tempo regulares.
IGRF	Remoção da influência do campo magnético de referência do campo magnético total.

3.2.3 Análise quali-quantitativa dos métodos potenciais

Para que seja possível uma boa interpretação dos dados gravimétricos e magnetométricos é feito o processamento de dados e, a partir deste, são gerados mapas temáticos de acordo com o que se deseja estudar.

Filtros de Fourier

Os filtros de Fourier são técnicas matemáticas de filtragem baseadas na Transformada de Fourier que permitem a remoção de ruídos e o realce ou atenuação de estruturas. A tabela 3.5 mostra quais são os principais tipos de filtros aplicados e a sua finalidade.

Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler é um método de inversão de campos potenciais que permite a análise das anomalias em profundidade. Tal método começou a ser desenvolvido por Thompson em 1982 com a resolução da equação homogênea de Euler (Equação 3.11) que é satisfeita por qualquer anomalia gravimétrica ou magnetométrica produzida por uma fonte pontual e que seja livre de interferências ou ruídos (Barbosa & Silva 2005).

$$(x - xo)\frac{\delta T}{\delta x} + (y - yo)\frac{\delta T}{\delta y} + (z - zo)\frac{\delta T}{\delta z} = -\eta T \qquad \text{Equação 3.11}$$

Nesta equação z é a altitude do levantamento, x e y são as coordenadas do ponto de medição e $T(x,y,z)$ é uma função de campo de uma fonte pontual tridimensional localizada em x_o, y_o e z_o. η, também chamado de índice estrutural, á a taxa de decaimento da intensidade

do campo com aumento a distância entre a fonte e o ponto medido e indica a forma geométrica da anomalia (Reid *et al.* 1990).

Tabela 3.5- Filtros de Fourier e suas finalidades. Fonte: Adaptado de Reid *et al.* (1990)

Tipo	Filtro	Finalidade
Frequência	Passa Baixa	Retira altas frequências obtendo informações de fontes profundas
	Passa Alta	Retira baixas frequências obtendo informações de fontes rasas
	Passa Banda	Evidencia as anomalias do intervalo de frequência desejado
Continuação	Para Baixo	Evidencia as anomalias mais rasas
	Para Cima	Filtra as altas frequências, evidenciando as anomalias mais profundas
Derivada	Gradiente vertical	Evidencia as fontes rasas
	Gradiente horizontal em X	Destaca as estruturas N-S
	Gradiente horizontal em Y	Destaca as estruturas E-W
	Residual	Remove as anomalias regionais, destacando anomalias locais
Outros	Amplitude do Sinal Analítico	Projeta em superfície as anomalias em profundidade
	Redução ao polo	Verticaliza o campo indutor reduzindo distorção das anomalias
	Redução ao Equador Magnético	Reduz o campo magnético ao plano x-y

Entre as vantagens do método da deconvolução de Euler está sua possibilidade de aplicação sem a necessidade de um modelo interpretativo inicial (Barbosa & Silva 2005), é necessário, contudo, o conhecimento geológico do terreno de forma a se escolher o índice estrutural mais adequado à anomalia observada. A tabela (Tabela 3.6) abaixo elenca os índices estruturais mais comuns e sua diferença na gravimetria e magnetometria.

Tabela 3.6- Principais índices estruturais. Fonte: Adaptado de Fitzgerald *et al.* 2003.

Índice Estrutural (η)		
Estruturas	*η (Gravimetria)*	*η (Magnetometria)*
Contatos	-1	0
Falhas, fraturas	0	1
Estruturas cilíndricas	1	2
Corpos esféricos	2	3

Quando efetuada na Amplitude do Sinal Analítico, a ferramenta da deconvolução de Euler é a mais confiável para se determinar a geometria e profundidade de uma anomalia gravimétrica ou magnetométrica (Salem & Ravat 2003).

3.3 RADIOMETRIA

A descoberta da radioatividade se deu em 1896 quando Becquerel encontrou um mineral que continha urânio e, logo em seguida com Marie Curie que descobriu o polônio e rádio a partir de estudos de minerais com urânio. A busca por minerais radioativos ganhou importância a partir do final do século XX com a crescente demanda por combustíveis nucleares, no entanto, a radiometria é um método de prospecção geofísica bem menos utilizado que os outros devido a especificidade de seus alvos. Existem cerca de 50 isótopos radioativos naturais, contudo, a maior parte deles são raros ou fracamente radioativos (Kearey *et al.* 2009). Destacam-se, porém, três elementos como os principais contribuintes da radioatividade natural das rochas: urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K).

A aplicação da radiometria se dá pela quantificação da radioatividade liberada através do decaimento radioativo destes elementos, tal contagem é feita por períodos de tempo fixos e através de contadores Geiger, cintilômetros, espectrômetros de raios gama e medidores de emanações de radônio. A radioatividade emitida pelos três radioelementos principais pode ser:

i. Partículas alfa (α);

ii. Partículas beta (β);

iii. Raios gama (γ).

Basicamente, segundo Kearey *et al.* (2009), as partículas α são a emissão de núcleos de hélio (^4_2He), as partículas β são provenientes da desintegração de nêutrons em prótons e elétrons e, os raios γ, são radiação eletromagnética liberada por núcleos energeticamente excitados durante o processo de desintegração. Além disso, os três tipos de desintegração radioativa possuem energias diferentes e, portanto, poder de penetração distintos. Partículas α, β e raios γ são barrados, respectivamente por uma folha de papel, alguns milímetros de alumínio e vários centímetros de chumbo. Em virtude dessa baixa penetrabilidade apenas as duas últimas possuem energia suficiente para serem quantificadas na radiometria e o método é capaz de mapear apenas rochas aflorantes a subaflorantes.

Tabela 3.7- Ocorrência de K, Th e U em diferentes minerais. Fonte: Adaptado de Telford *et al.* 1990.

Potássio (K)	
Mineral	*Ocorrência*
Ortoclásio e microclína [$KAlSi_3O_8$]	Constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos
Moscovita [$H_2KAl(SiO_4)_3$]	Constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos
Alunita [$K_2Al_6(OH)_{12}SiO_4$]	Alteração em vulcânicas ácidas
Sylvita, carnalita [KCl, $MgCl_2.6H_2O$]	Depósitos de salinas em sedimentos
Tório (Th)	
Mineral	*Ocorrência*
Monazita [ThO_2 + raro fosfato terrígeno]	Granitos, pegmatitos, gnaisses
Torianita [$(Th, U)O_2$]	Granitos, pegmatitos, pláceres
Torita, uranotorita [$ThSiO_4$ + U]	Granitos, pegmatitos, pláceres
Urânio (U)	
Mineral	*Ocorrência*
Uraninita [óxido de U, Pb, Ra + Th, terras raras]	Granitos, pegmatitos e/com depósitos em veios de Ag, Pb, Cu, etc.
Carnotita [$K_2O.UO_3.V_2O_5.2H_2O$]	Arenitos
Gummita [alteração da uraninita]	Associado à uraninita

Th, U e K são elementos litófilos e tendem a se concentrar preferencialmente em rochas ígneas ácidas quando comparadas com rochas intermediárias, básicas e ultrabásicas. No geral a concentração destes elementos é mais significativa em rochas sedimentares e sedimentos metamorfisados em detrimento de outras rochas ígneas ou metamórficas com a exceção de granitos ricos em potássio (Telford *et al.* 1990). A Tabela 3.7 e a Figura 3.5 relacionam os elementos às suas principais ocorrências rochosos.

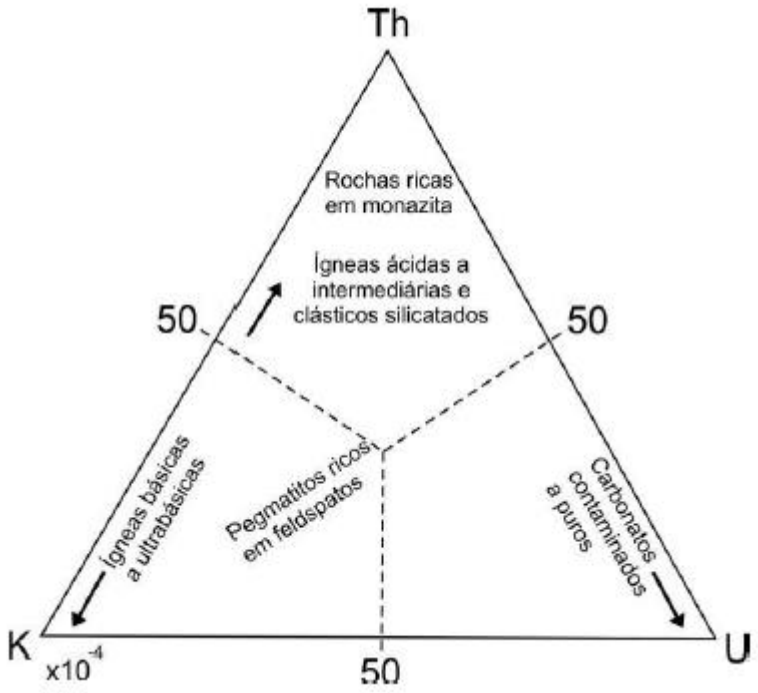


Figura 3.5: Diagrama correlacionando a abundância de elementos radioativos em determinados tipos de rocha. Modificado de Kearey *et al*. (2009).

Os mapas de elementos radioativos são efetivos para distinção de rochas e localização de *trends* estruturais sendo bastante aplicados como ferramenta complementares em mapeamentos geológicos. A principal aplicação da radiometria é, contudo, em correlações estratigráficas na descrição de poços de óleo e gás. A ferramenta mostra-se também bastante útil na prospecção de depósitos de elementos radioativos ou não radioativos com elementos radioativos associados. E, pode-se ainda, em associação com outros métodos geofísicos, identificar áreas com metamorfismo hidrotermal e explorar processos de mineralização em diferentes contextos geológicos (Telford *et al.* 1990).

CAPÍTULO 4

ANÁLISE QUALITATIVA

4.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo apresenta-se a metodologia para confecção dos mapas temáticos e a análise qualitativa dos mapas temáticos locais gerados em cada um dos métodos geofísicos utilizados (gravimetria, magnetometria e radiometria).

4.2 METODOLOGIA PARA CONFECÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

A confecção de mapas gravimétricos e magnetométricos foi dividida em duas etapas (Figura 4.1): (i) mapas temáticos regionais, envolvendo todo o feixe Colatina e (ii) mapas temáticos locais, envolvendo a área de estudo de detalhe. Já na radiometria foram utilizados mapas da área de estudo de detalhe gerados por Antonino Juarez Borges do Serviço Geológico do Brasil - CPRM especialmente para esta monografia.

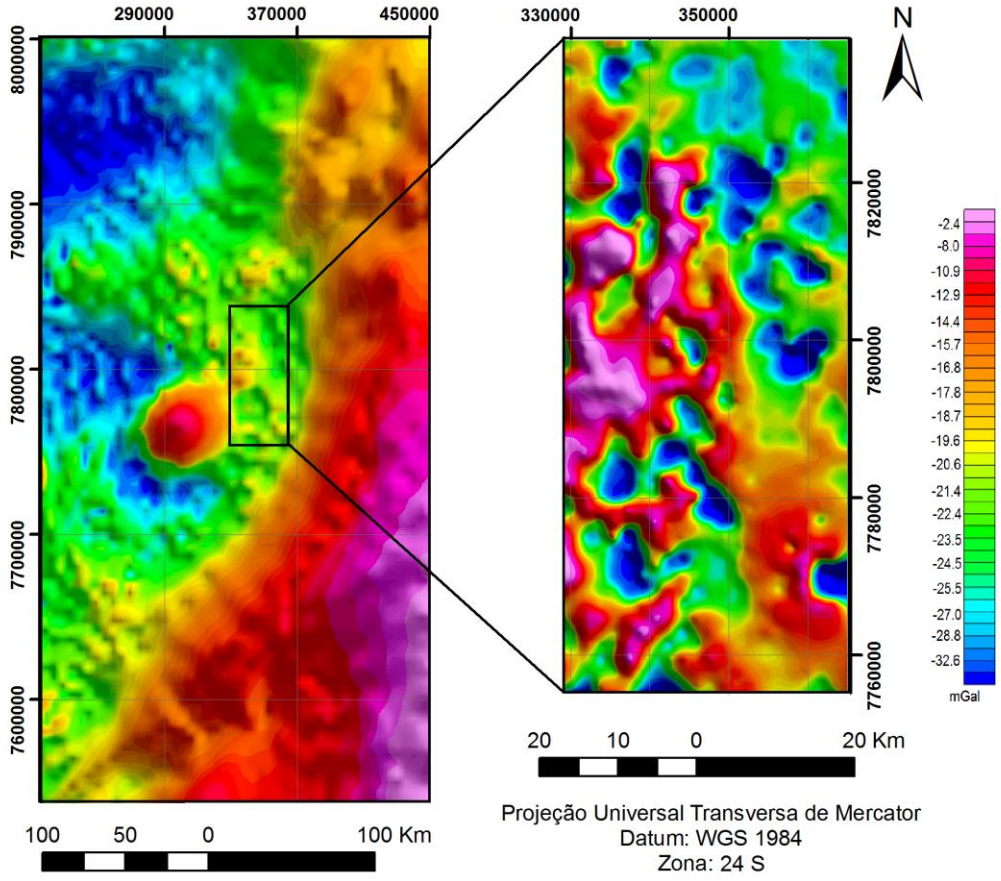


Figura 4.1: Mapas da Anomalia gravimétrica Bouger, em escala regional e local (em detalhe).

Como descrito no capítulo 1, item 1.4 (Estratégia de ação, materiais e métodos), o banco de dados de magnetometria e radiometria foi fornecido pela CPRM e é proveniente do levantamento aerogeofísico realizado pela CODEMIG entre os anos de 2005 e 2006 com altura de voo fixada em 100 m. Já os dados de gravimetria são da missão TOPEX/Poseidon, executada pela NASA e CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) entre os anos de 1992 e 2006 e com banco de dados disponível em: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi.

A confecção dos mapas segue uma rotina base de processamento de dados que é comum aos dois métodos e está especificada no fluxograma (etapas I e II) da Figura 4.2. A fase inicial do processamento se deu através de uma rotina no *software* Oasis Montaj 7.0.1 (sistema Geosoft S.A.) na qual é importado o arquivo base no formato .ascii e gerado um arquivo no formato .gbd. Com base no método da mínima curvatura, é feita a definição do grid e interpolação dos dados, tendo sido utilizada uma malha quadrada regular, com interpolação ajustada em células de 300 m. Partindo de um malha gridada com boa resolução e que atenda aos requisitos do projeto, é possível iniciar a geração dos chamados "mapas primários" (ex.: Mapa Free Air na gravimetria e Mapa de Campo Anômalo na magnetometria). Ao longo do processo são aplicados os filtros de Fourier (descritos no Capítulo 3) de acordo com os objetivos específicos para identificar anomalias, realçar ou atenuar estruturas. Por fim, são gerados os mapas temáticos colorpéticos, que são, posteriormente, exportados em formato .tif para o *software* ArcGIS 9.3 onde é feita a integração geológico-geofísica e interpretação qualitativa da subsuperfície. A base metodológica para geração de mapas é a mesma para gravimetria e magnetometria e os mapas gerados em cada caso serão discutidos nos tópicos a seguir.

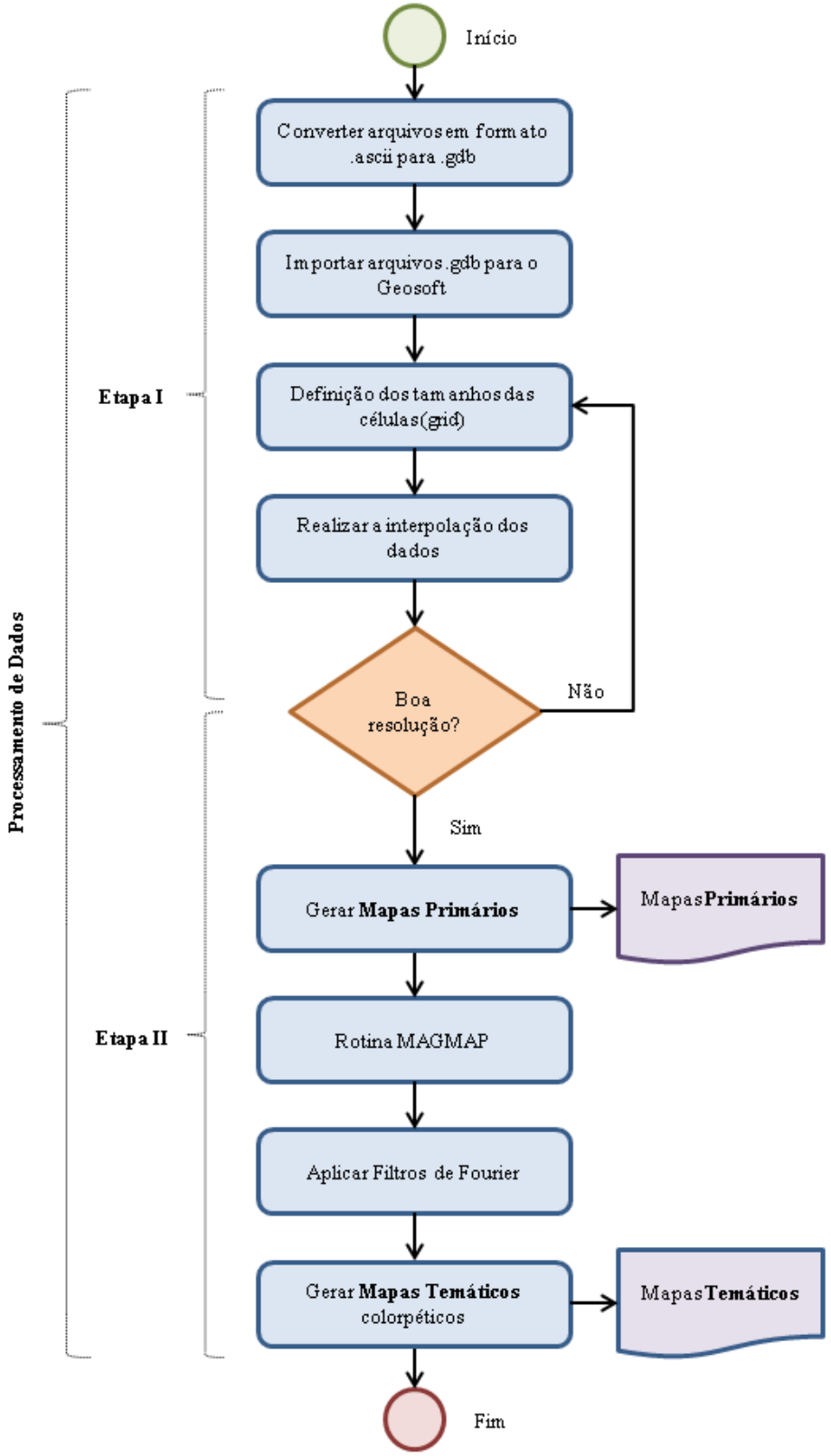


Figura 4.2: Fluxograma com processamento de dados na geração dos mapas de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria).

4.3 GRAVIMETRIA

Os dados gravimétricos foram analisados no intuito de examinar melhor o comportamento das rochas em subsuperfície, principalmente no que se refere ao contato crosta-manto. No processamento de dados foram gerados mapas gravimétricos das anomalias Free Air e Bouger em caráter regional e local e o mapa de modelo digital do terreno. A confecção dos mapas seguiu a metodologia do fluxograma para geração de mapas de métodos potenciais (Figura 4.2) e a Etapa II deste processo está mais bem detalhada Figura 4.3. É importante lembrar que o mapa de anomalia Bouger foi gerado a partir de manipulações matemáticas da anomalia Free Air, como explicitado no capítulo anterior.

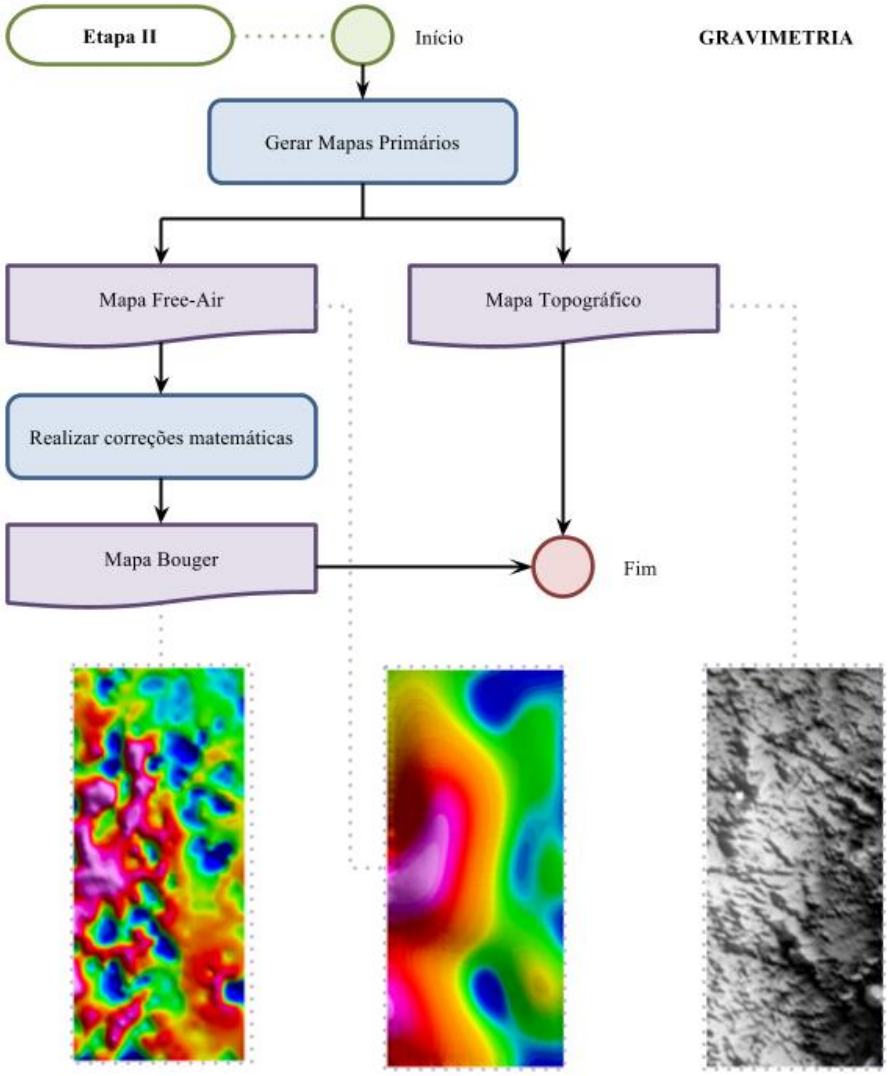


Figura 4.3: Fluxograma com os passos para geração dos mapas gravimétricos.

A análise qualitativa gravimétrica foi feita com base no mapa Bouger a partir do qual foram definidos, para área de estudo de detalhe, três domínios gravimétricos (a, b e c) de acordo com a intensidade da anomalia gravimétrica (Figura 4.4).

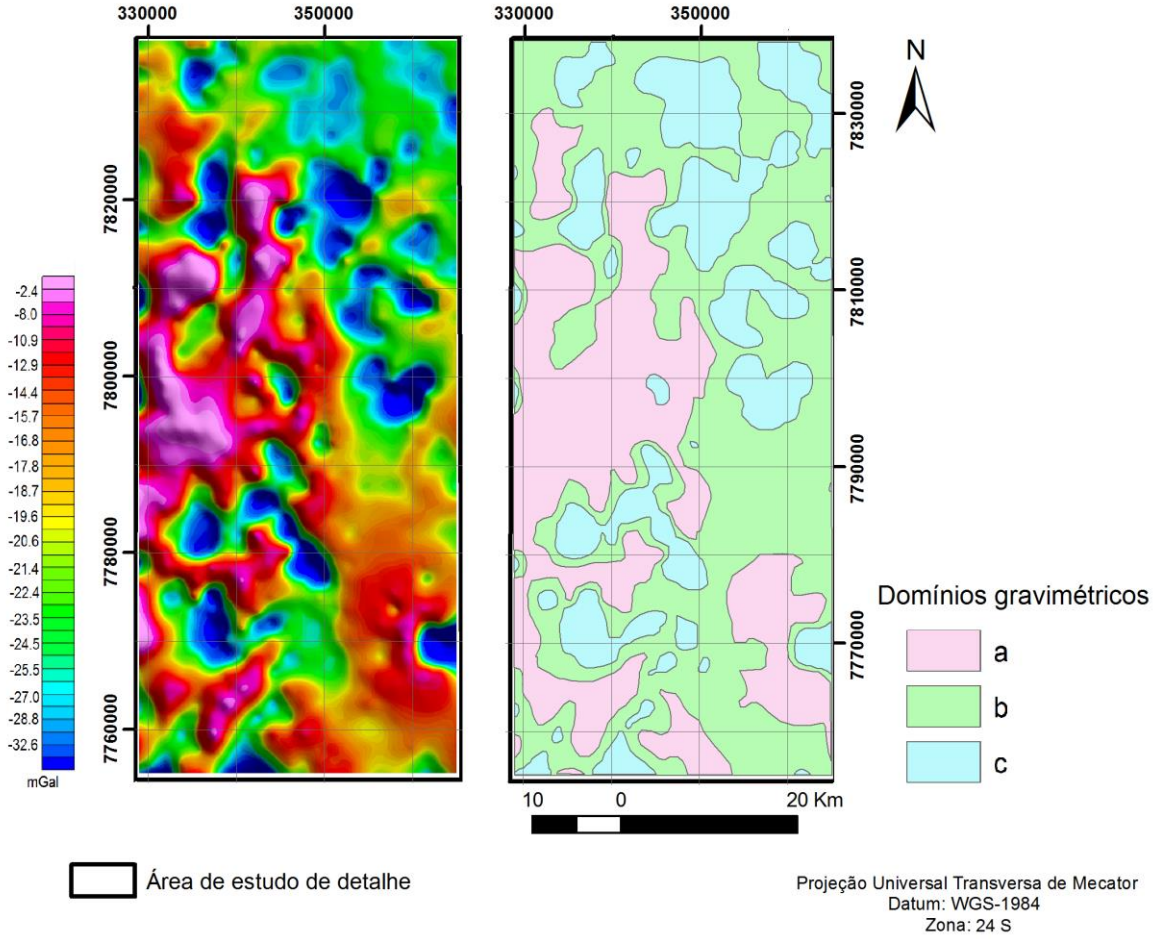


Figura 4.4: Mapa de Anomalia Bouger e mapa de domínios gravimétricos.

O domínio “a” apresenta os mais altos valores gravimétricos com variações entre -2,4 e 14,4 mGal. Encontra-se ramificado em toda porção oeste da área com a maior anomalia localizada na região central (aproximadamente nas coordenadas 7785000, 335000), tendo sido caracterizada também outra anomalia a sudoeste.

O domínio “b”, por sua vez, representa respostas gravimétricas intermediárias, no intervalo de -14.4 e -25.5 mGal, e aloja-se, em sua maioria, a leste. Já os domínios “a” e “c” apresentam-se em anomalias com formatos circulares ou ovais, este domínio funciona como

"pano de fundo", abrangendo todos os espaços não ocupados pelos outros dois, sendo assim, o domínio mais abundante na área.

Por fim, o domínio "c" possui os mais baixos valores gravimétricos, variando entre -25.5 e -32.6 mGal. Encontra-se espalhado em corpos com características circulares nas regiões norte e sul da área e apresenta anomalias de menor tamanho, quando comparado aos outros dois domínios.

4.4 MAGNETOMETRIA

O estudo magnetométrico foi o mais detalhado visto que este é o método geofísico que mais se adequa à visualização de rochas ígneas sem que as anomalias magnéticas sejam influenciadas pela cobertura (Kearey *et al.* 2009).

A elaboração dos mapas magnetométricos também envolveu as escalas regional e local e seguiu a mesma lógica descrita no fluxograma para geração de mapas de métodos potenciais (Figura 4.2), do qual, a etapa II encontra-se detalhada no fluxograma abaixo (Figura 4.5). A primeira tarefa realizada foi a aplicação de correção do IGRF e, a partir daí, foram gerados os mapas de campo anômalo (CA) e amplitude do sinal analítico (ASA). Em seguida, foi realizada a "rotina magmap" onde é inserido o *grid* (pré-processamento) e são aplicadas as filtragens através do cálculo da transformada rápida de Fourier mudando para o domínio da frequência. Fizeram-se, então, filtragens de continuação para cima e derivações, que resultaram em oito mapas colorpéticos. As filtragens de continuação para cima abrangeram quatro valores diferentes (1000, 2500, 5000 e 10000 m) e as derivações foram realizadas em gradiente horizontal nas direções x e y (DX, DY) e em gradiente vertical em primeira e segunda ordem (DZ e D2).

A análise magnetométrica obtém respostas menos profundas que a gravimetria, uma vez que estes dados são aerolevantados, e pode dar informações valiosas sobre as rochas supra-crustais, ajudando a entender a estruturação da área. De maneira análoga ao método anterior, foi realizada interpretação dos principais domínios, desta vez em função da magnetização das rochas, da área de estudo. O mapa base para definição das magnetofacies foi o de amplitude do sinal analítico, devido ao seu caráter monopolar, evitando assim possíveis erros de interpretação relacionados a anomalias dipolares.

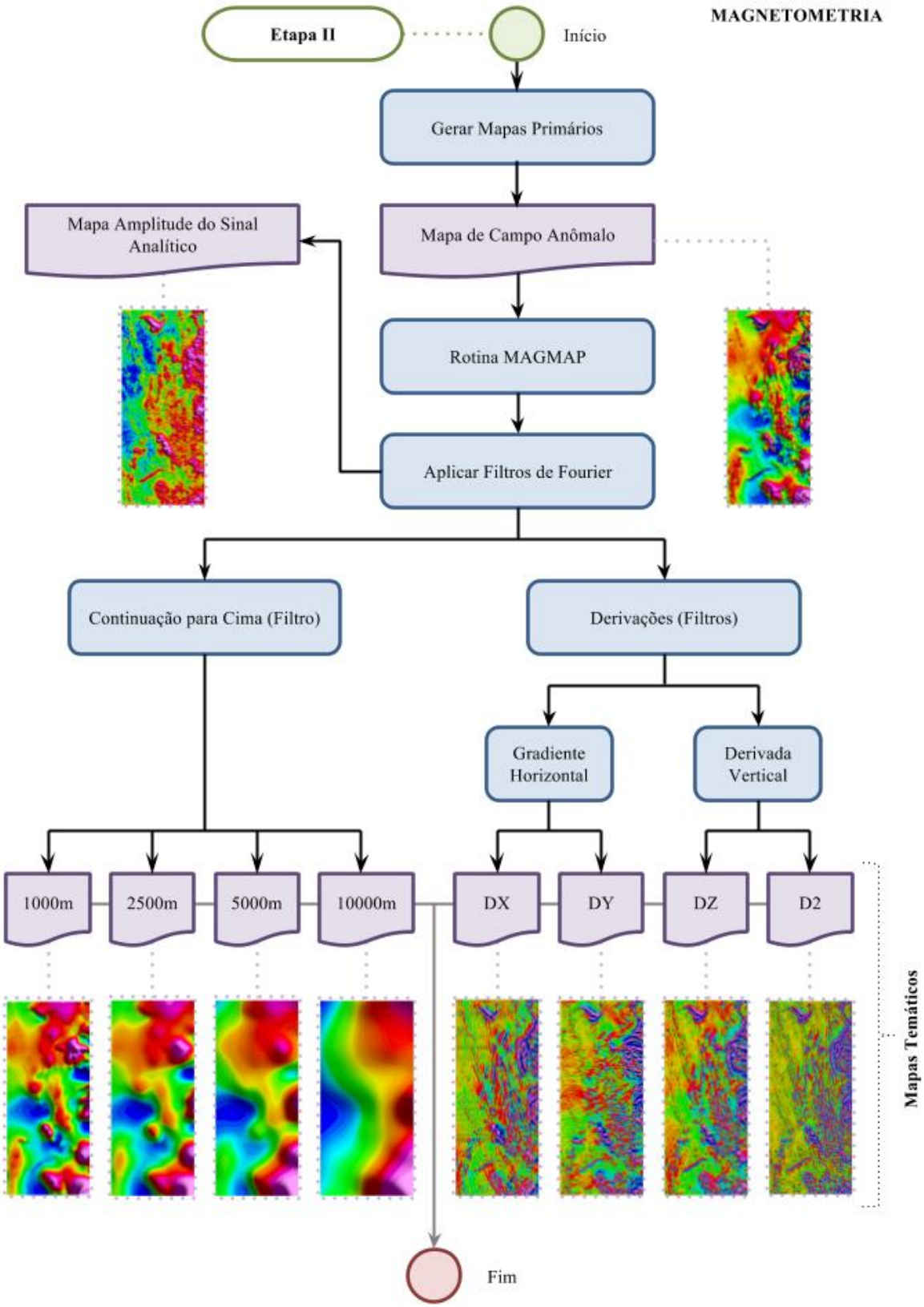


Figura 4.5: Fluxograma com os passos para geração dos mapas magnetométricos.

A região de estudo foi dividida em três magnetofacies (“a”, “b” e “c”) de acordo com variação da susceptibilidade magnética da área (Figura 4.6).

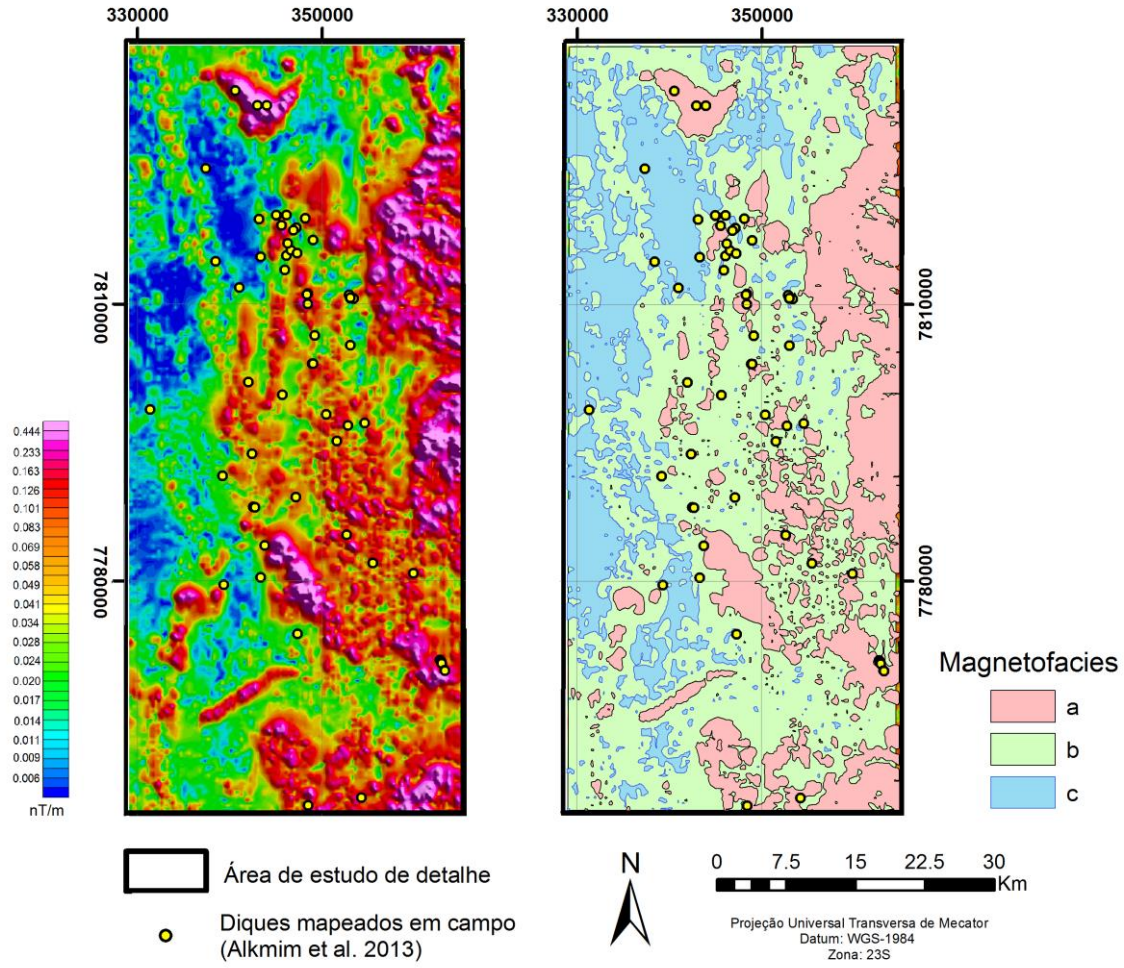


Figura 4.6: Mapa de Anomalia de Amplitude do Sinal Analítico e mapa de magnetofacies.

A magnetofacies “a” caracteriza-se por sua alta magnetização, e consequente alta susceptibilidade magnética (entre -0.444 e 0.058 nT), e as anomalias possuem altas amplitudes e baixos comprimentos de onda. Encontra-se em toda porção leste da área com anomalias expressivas e outras marcadas por pequenas feições, aproximadamente circulares. Algumas anomalias alongadas a oeste da área também chamam atenção, sendo a mais evidente a anomalia em formato de “v” ao norte. Além disso, foram observadas pequenas anomalias circulares alinhadas a noroeste da área segundo a direção NW-SE.

A magnetofacies “b” apresenta os valores intermediários de magnetização (de 0.058 a 0.014 nT) e é a mais abrangente, bordejando as outras duas magnetofacies. Embora distribuída por toda área, localiza-se, preferencialmente, na porção central.

Já a magnetofacies “c” apresenta baixas amplitudes e altos comprimentos de onda, caracterizando-se pelos menores valores de magnetização (com variação entre 0.014 e 0.003 nT). Localiza-se principalmente na porção oeste da área de estudo e é marcada por três grandes baixos magnetométricos com alinhamento próximo à NW-SE e outras anomalias vermiformes menores, distribuídas ao longo do mapa.

A partir dos mapas temáticos de gradiente vertical, gradiente horizontal em y e amplitude do sinal analítico foram interpretados os principais lineamentos na área de estudo (Figura 4.7) com o auxílio do *software* ArcGIS 9.3. Primeiramente foram traçados os lineamentos em cada um dos mapas com o objetivo de realçar as estruturas em diferentes direções. Dessa forma, no mapa de derivada vertical (DZ) foram evidenciadas as fontes rasas e, no mapa com filtragem em gradiente horizontal em y (DY) foi possível destacar as estruturações leste-oeste. Em seguida, todos os lineamentos foram compilados, plotados sobre o mapa ASA e analisados na roseta com o auxílio do *software* Stereonet.

O mapa da Figura 4.7 é uma compilação dos lineamentos supracitados (n=1541) sobre o mapa de amplitude do sinal analítico. Percebe-se que a principal direção dos lineamentos é NNW-SSE, conforme confirmado pelo diagrama de roseta que aponta como direção principal o azimute 349,7º. Além disso, são expressivos lineamentos com estruturação W-E que geram “rupturas” nos grandes lineamentos de direção NNW-SSE, sugerindo uma relação temporal posterior à direção de lineamentos principal. Ademais, são presentes lineamentos na direção NE-SW, sendo alguns deles muito bem marcados por uma grande anomalia magnetométrica, a sul do mapa magnetométrico.

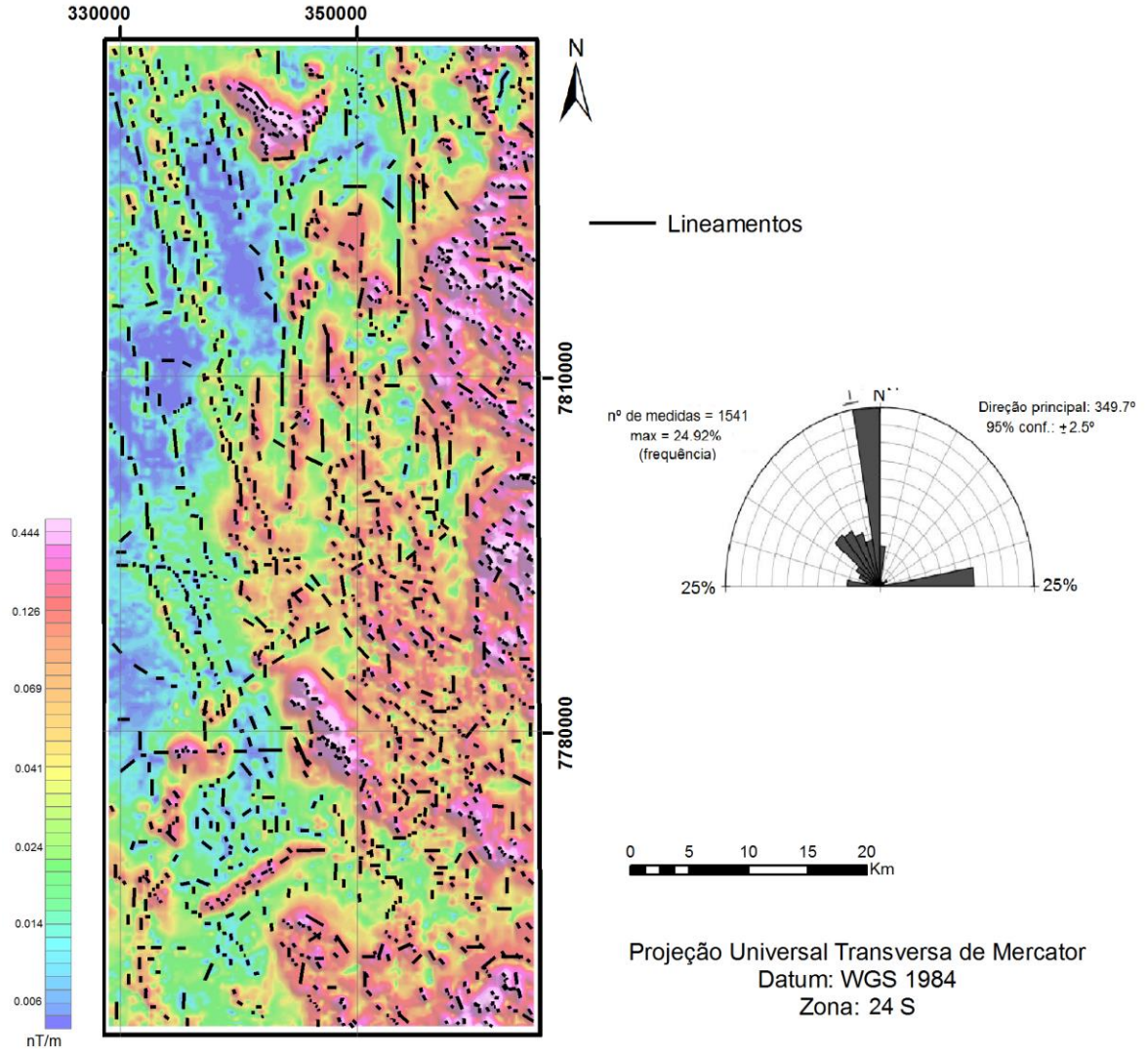


Figura 4.7: Compilação dos lineamentos anteriores sobre o mapa ASA. OBS.: Transparência no mapa de 50%.

Ainda nos dados magnetométricos foram realizadas análises a partir da filtragem de continuação para cima com dados que simulam profundidades de voo de 1000, 2500, 5000 e 10000 m (Figura 4.8). A aplicação desta técnica retira as anomalias mais superficiais e permite a análise da continuidade vertical dos corpos em profundidade. É possível perceber nos mapas que os lineamentos NNW-SSE possuem uma boa nitidez somente no filtro continuação para cima de 1000 m (Figura 4.8-a) e apresentam apenas alguns nuances nos mapas de 2500 m (Figura 4.8-b), não aparecendo nos demais mapas. Esse comportamento permite dizer que tais lineamentos possuem caráter superficial. É notável nas figuras a continuidade em profundidade das principais anomalias magnetométricas, localizadas a leste da área, sendo a anomalia no extremo sudeste a mais marcante e persistente. Ademais, no

último mapa (Figura 4.8-d), com continuação para cima de 10000 m, podem ser vistas transições entre domínios diferentes com o aumento contínuo da anomalia magnetométrica.

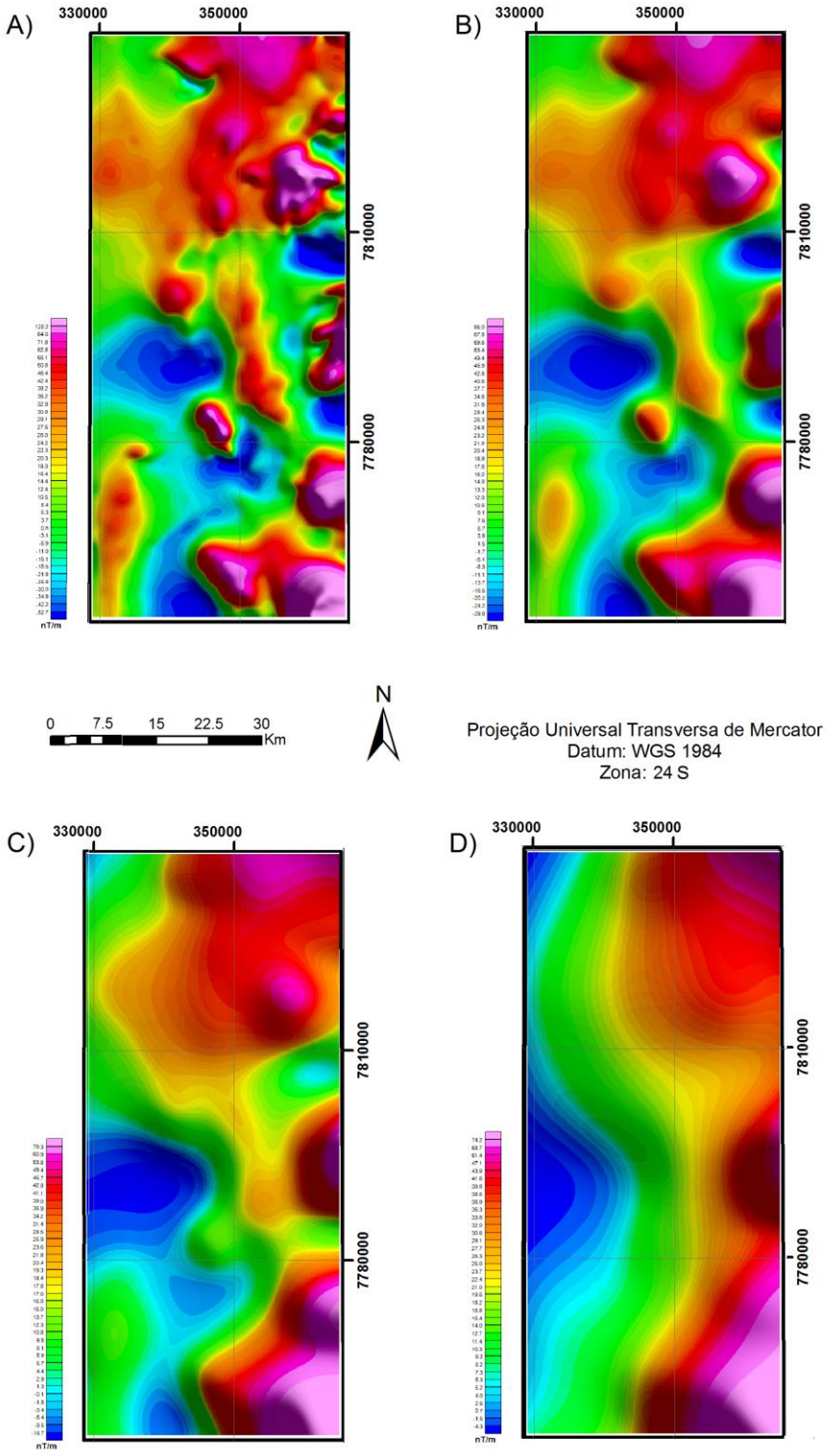


Figura 4.8: Mapas de continuação para cima da área de estudo de detalhe com filtros de (A)1000m; (B)2500m; (C)5000m e (D)10000m.

4.5 RADIOMETRIA

A radiometria auxilia no mapeamento geológico uma vez que se trata de um método de baixa penetrabilidade e que mede a distribuição de U, Th e K em superfície, e esses isótopos são litófilos. A aquisição dos dados radiométricos é realizada a partir de cintilômetros que fazem a contagem por segundo dos elementos radioativos em diferentes canais. A partir daí pode ser feita a análise de cada elemento individualmente ou em associação. Os mapas radiométricos são parte complementar deste estudo e foram gentilmente cedidos pelo geofísico Antonino Juarez Borges da CPRM. Deste modo, foram obtidos três mapas temáticos e uma imagem: canais de K, Th e U e imagem ternária (RGB).

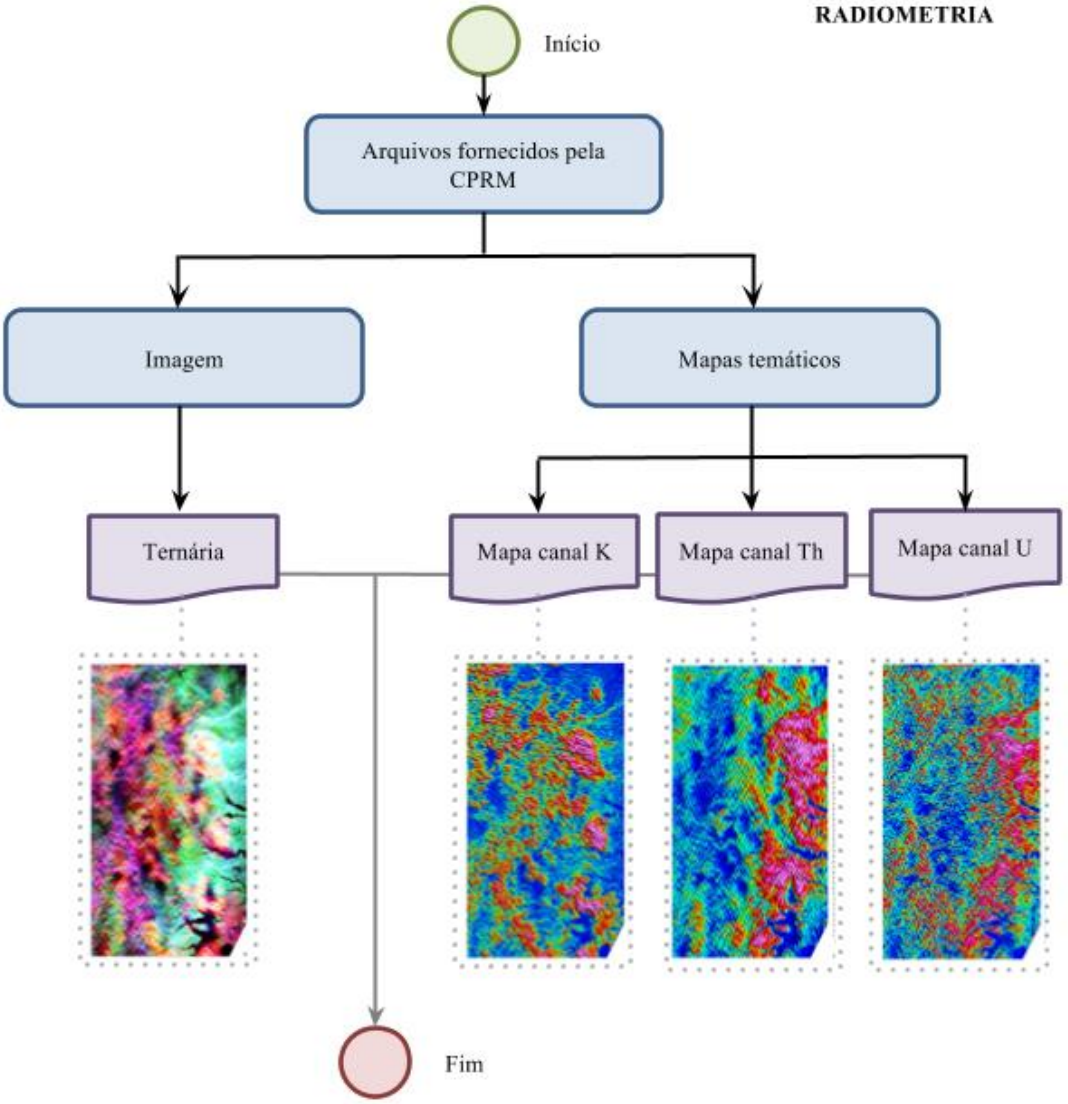


Figura 4.9: Fluxograma apresentando os mapas radiométricos.

Analogamente aos métodos anteriores, foram definidos domínios (Figura 4.10). As radiofacies foram interpretadas com base nas assinaturas de radiometria gama similares e em função da variação de concentração dos elementos.

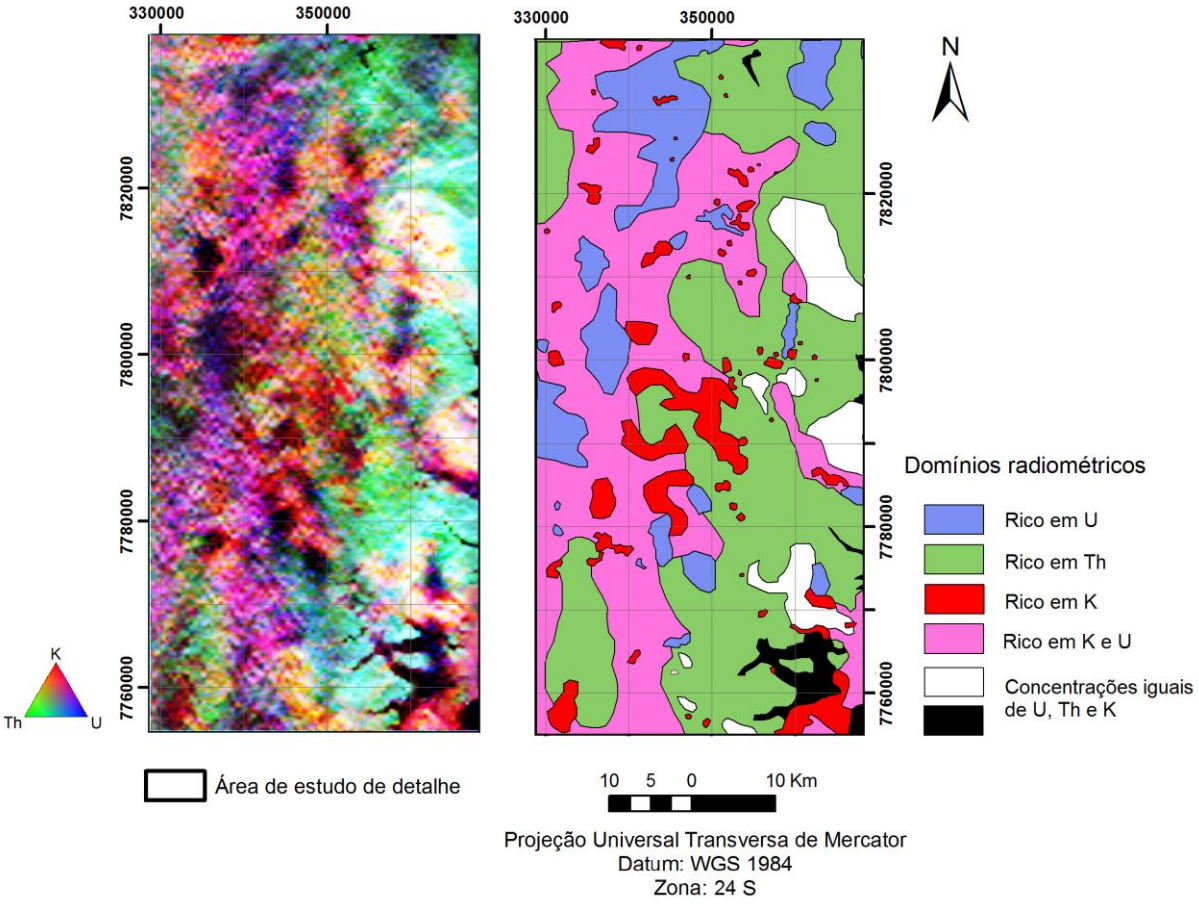


Figura 4.10: Imagem ternária e mapa de domínios radiométricos.

Em uma análise mais geral é possível observar que o mapa subdivide-se em duas grandes regiões: a oeste com quantidades expressivas de potássio e urânio e a leste com grande concentração de tório. No entanto, para uma análise mais criteriosa, foram delimitadas cinco radiofacies: (i) alta concentração de U, (ii) alta concentração de Th, (iii) alta concentração de K e (iv) alta concentração de K e U e (v) radiofacies com concentração em equilíbrio ("v_a" alta ou "v_b" baixa) dos três elementos. No domínio "i" observa-se que as porções na qual o U se destaca estão distribuídas por toda a área, mas encontram-se principalmente na região centro-norte. Já o domínio "ii" é o de maior extensão e predomina na porção leste. Por sua vez, o domínio "iii" é marcado por expressivas anomalias de K ao

longo do mapa, sendo que as maiores estão sempre associadas ao domínio "iv", rico em K e U. Por fim, o domínio "v" está localizado a leste, do centro ao sul e tendem a indicar a abundância ou ausência dos três elementos na mesma proporção.

Os mapas para os canais de Th, U e K estão apresentados abaixo (Figura 4.11). A análise individual de cada elemento é de fácil interpretação e ajuda na compreensão da imagem ternária mostrada anteriormente (Figura 4.10). Assim, é visível que existe uma expressiva anomalia na porção nordeste da área que é comum aos três radioelementos e pode ser relacionada ao domínio da radiofacies "v_a" no mapa ternário. Analogamente, a sudeste nos mapas dos três canais nota-se uma deficiência dos elementos em uma região de formato radial, esta pode ser relacionada ao domínio da radiofacies "v_b" de mesma localização no mapa ternário, indicando baixa concentração dos três elementos. Percebe-se ainda a grande correlação entre K e U cuja distribuição abrange todo o mapa, ao passo que as anomalias de Th predominam na porção oeste.

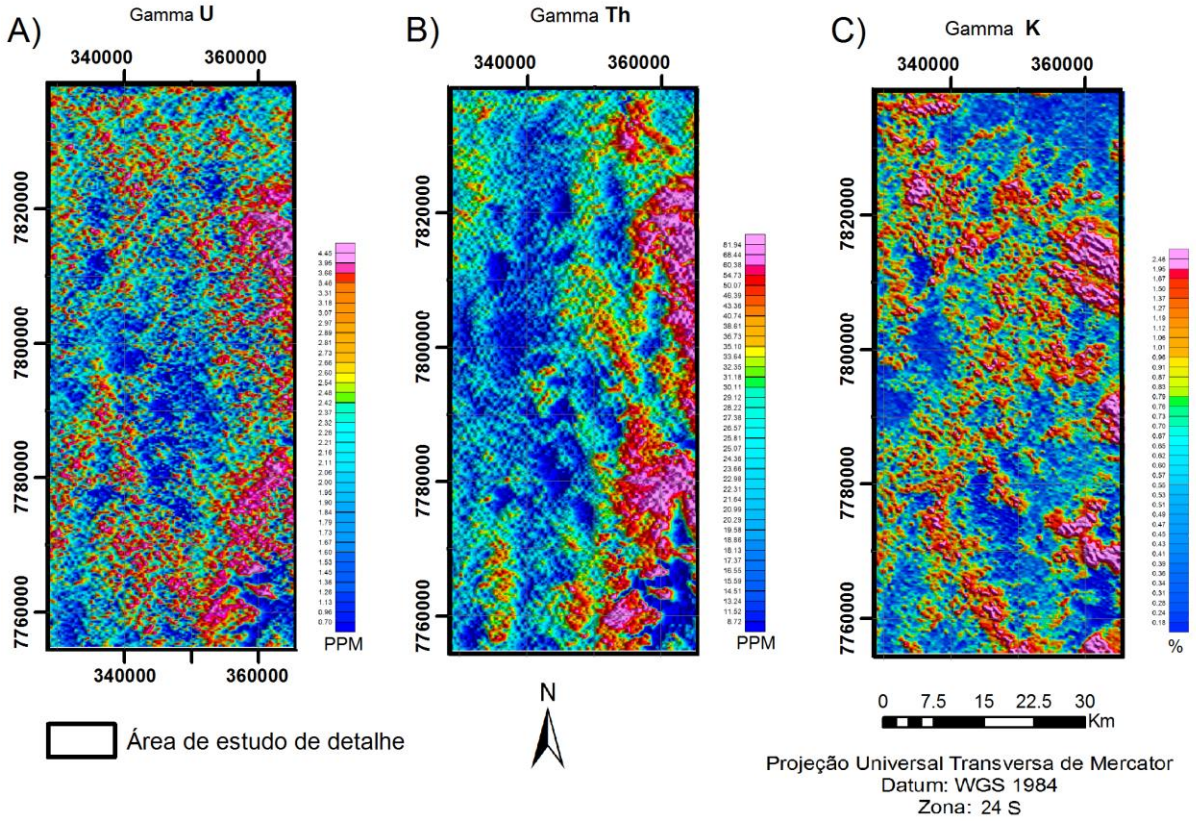


Figura 4.11: Mapas dos canais de (A) U, (B) Th e (C) K.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE QUANTITATIVA

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados a metodologia e os resultados gerais da inversão geofísica de dados dos métodos potenciais pela aplicação da Deconvolução de Euler. A análise quantitativa foi feita em escala local a partir da magnetometria e, em escala regional pelos dados gravimétricos. A partir deste método, objetiva-se estimar a profundidade média do topo das fontes magmáticas e gravimétricas e entender o comportamento dos corpos rochosos em profundidade, gerando uma visão em 3D.

5.2. METODOLOGIA PARA INVERSÃO DE DADOS POTENCIAIS

A metodologia para geração dos modelos tridimensionais segue basicamente cinco grandes etapas, descritas a seguir. Na análise quantitativa local, foram utilizados os dados de magnetometria provenientes do mapa de Amplitude de Sinal Analítico e, na inversão regional, utilizaram-se os dados de gravimetria provenientes do mapa Bouger.

O primeiro passo é a definição da malha de perfis no *software* ArcMap (9.0), que é feita conforme a direção (deve ser perpendicular à feição de estudo) e espaçamento dos mesmos. Para a inversão local, foram feitos 34 perfis com direção E-W e espaçamento de 100 m. A análise regional contou com 9 perfis, dispostos também na direção E-W e com espaçamento de 20 km (Figura 5.1). A seguir os perfis são importados para *software* Oasis Montaj 7.0.1 onde são extraídos os dados geofísicos de cada perfil e é gerado um novo banco de dados com tais informações. Deve-se ainda coletar as coordenadas dos perfis, o que pode ser feito digitalmente a partir do *grid*.

Após os passos mencionados, os dados são exportados (carregados na interface do programa) para o *software* Euler 1.0, no qual é realizada a deconvolução dos mesmos calculando a profundidade das anomalias contidas em cada um dos perfis. O programa exige o *input* de alguns dados como altura de voo, índice estrutural, profundidade máxima e tamanho da janela. Tais parâmetros variam conforme o método, a escala de mapeamento geofísico e o objetivo da análise. Em ambos os casos utilizou-se o tamanho da janela “11”. Já o índice estrutural escolhido para melhor visualização dos diques foi o de “estruturas cilíndricas”

(Capítulo 3 - Tabela 3.6 “Principais índices estruturais.”), sendo 2 para a magnetometria e 1 para a gravimetria. A altura de voo do aerolevantamento foi de 100 m para a magnetometria e 1.300m na gravimetria (satélite). Por sua vez, a profundidade máxima atingida por cada método foi de 5.000 m na análise local (magnetometria) e 50.000 m na análise regional (gravimetria). As Figuras 5.2 e 5.3 mostram exemplos de processamento no Euler para cada um dos métodos.

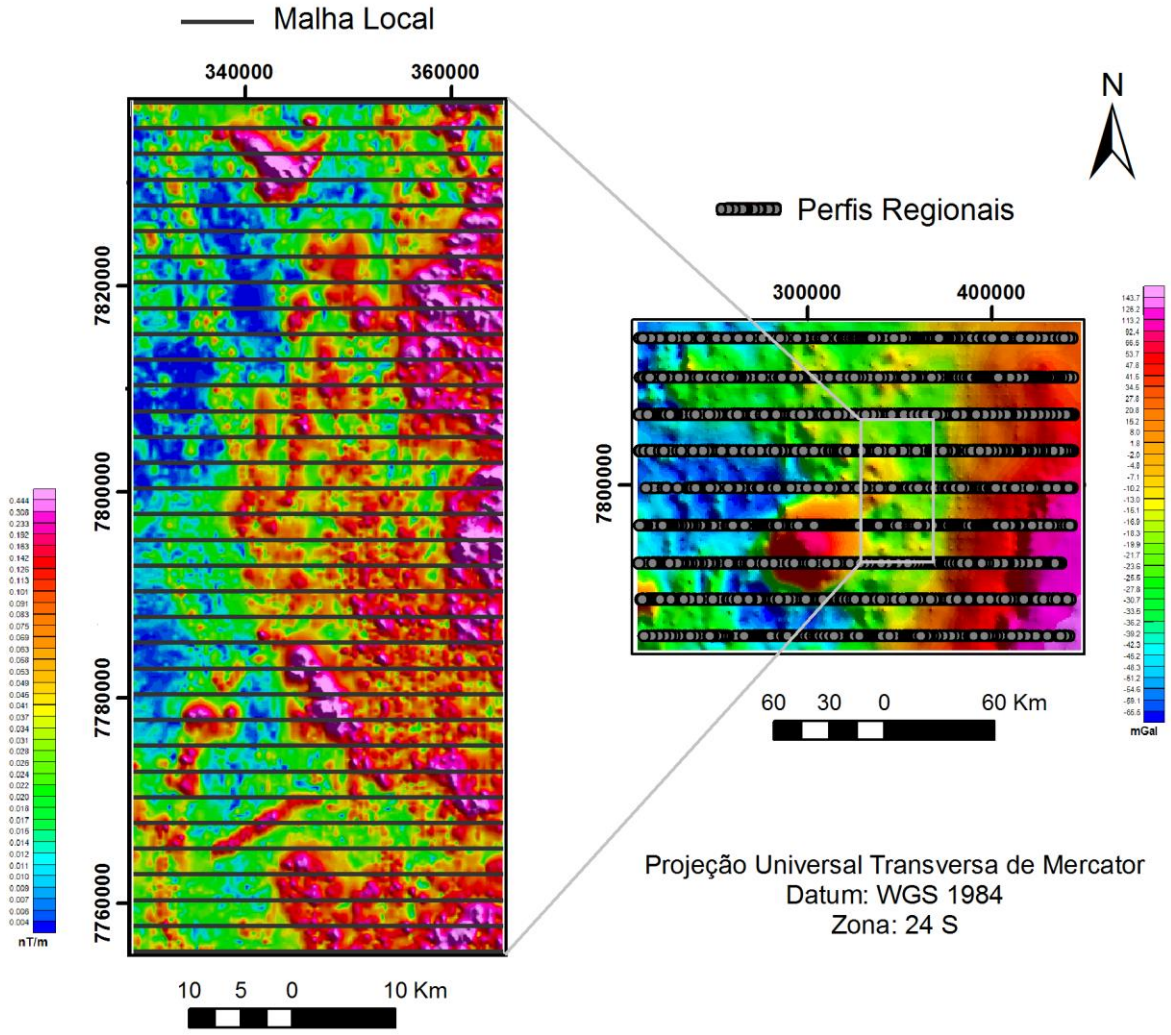


Figura 5.1: Malha local de deconvolução magnetométrica sob o Mapa ASA (à esquerda) e perfis segundo a malha regional de deconvolução gravimétrica sob o mapa Bouger (à direita).

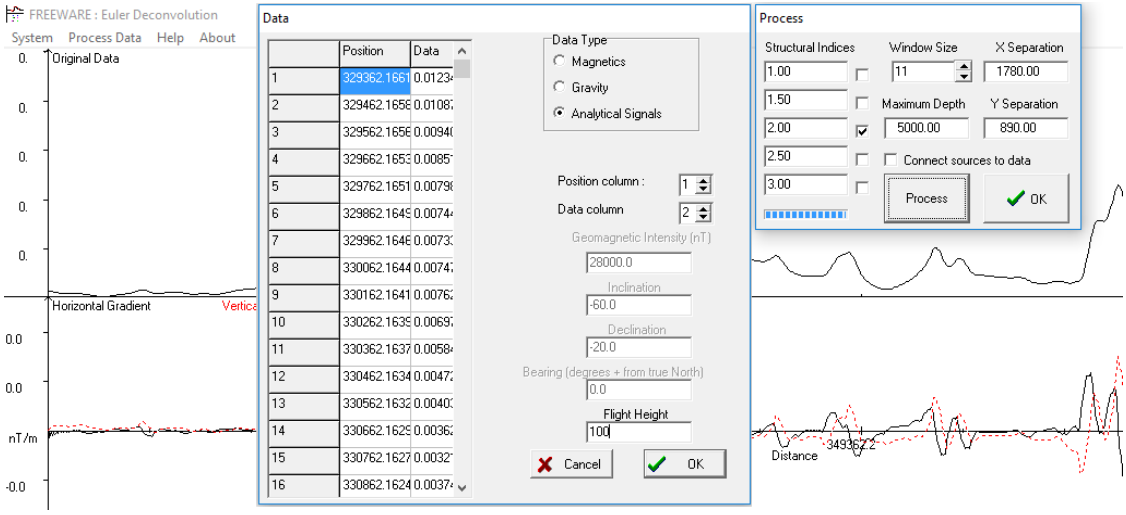


Figura 5.2: Exemplos de i*nputs* no *software* Euler 1.0 para o perfil local 21, utilizando os dados de magnetometria.

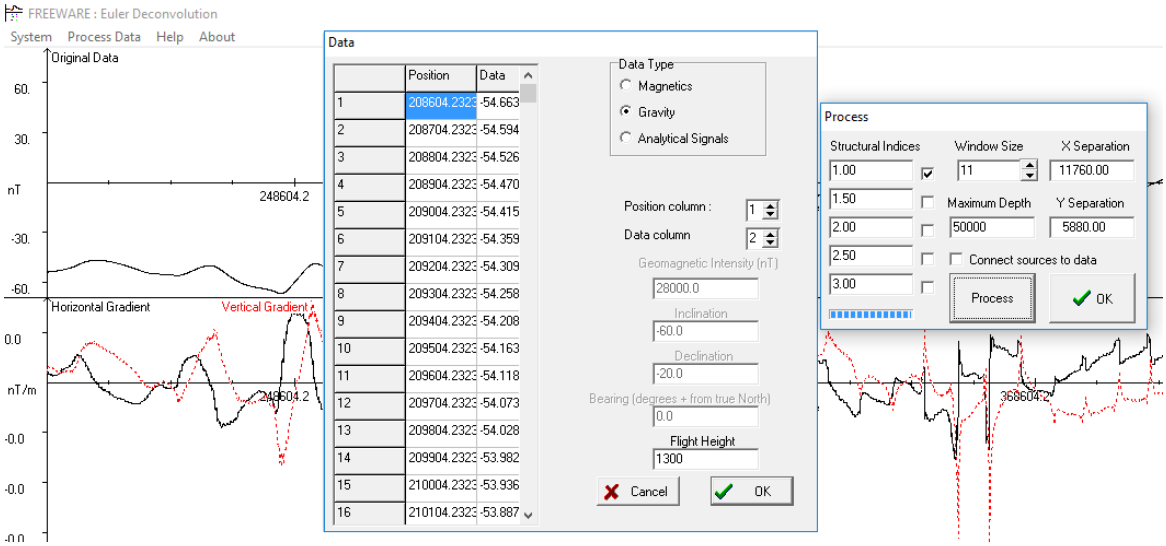


Figura 5.3: Exemplos de i*nputs* no *software* Euler 1.0 para o perfil regional 4, utilizando os dados de gravimetria.

Após o processamento, os dados, já com as coordenadas x,y e z definidas, devem ser enviados para o *software* ArcGIS, onde os perfis são unidos em uma única *shape* no ArcMap. Por fim, utiliza-se o *software* ArcScene onde se faz a interpolação de dados de acordo com suas profundidades relativas e é gerado o modelo 3D (krigagem) correspondente a cada um dos métodos potenciais.

5.3 RESULTADOS DAS INVERSÕES PELA DECONVOLUÇÃO DE EULER

Como resultados das inversões de dados potenciais tem-se a correlação das anomalias com as profundidades de suas fontes geradoras. A profundidade relativa "alcançada" por cada método geofísico varia, sendo próprio da magnetometria respostas mais superficiais do que as da gravimetria. Além disso, essa diferença se dá pelo tipo de levantamento de cada método geofísico. Vale lembrar que os dados de magnetometria foram obtidos por aerolevantamento enquanto que os de gravimetria são provenientes de mapeamentos por satélite. A Figura 5.4 a seguir permite a comparação entre as escalas dos dois modelos.

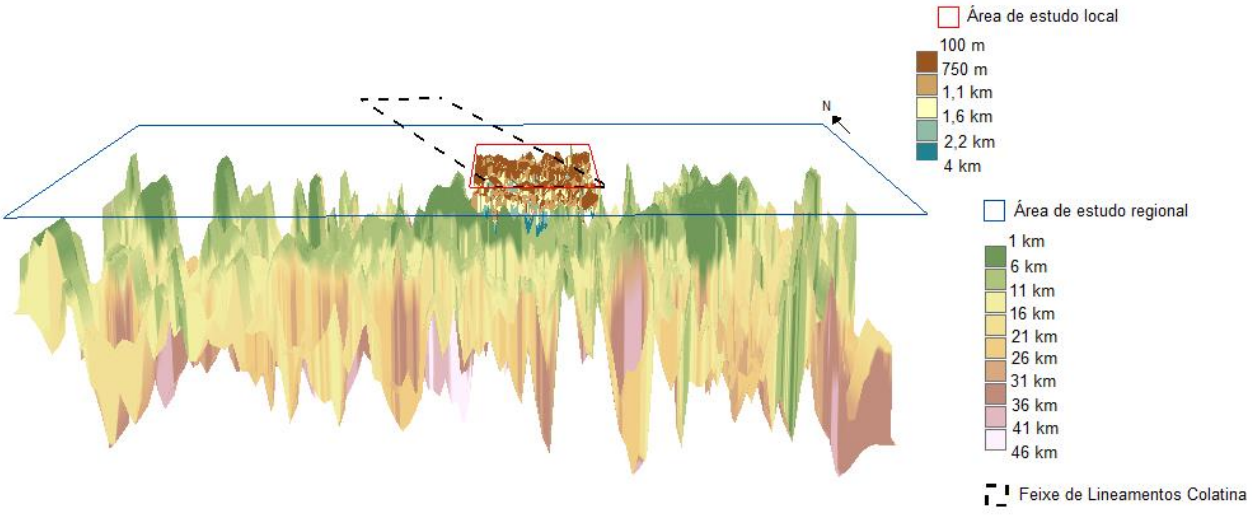


Figura 5.4: Comparação dos modelos tridimensionais em escala local (magnetométrico) e regional (gravimétrico).

Na inversão local pela magnetometria, nota-se que, apesar da profundidade máxima ser 4 km, a maior parte das anomalias é ainda mais superficial, com sua origem a cerca de 2 km (Figura 5.5). Já a análise regional mostra uma grande variação dos topos das anomalias gravimétricas, com profundidades máximas chegando a 40 km (Figura 5.6). A maior densidade de dados encontra-se em profundidades de até 25 km.

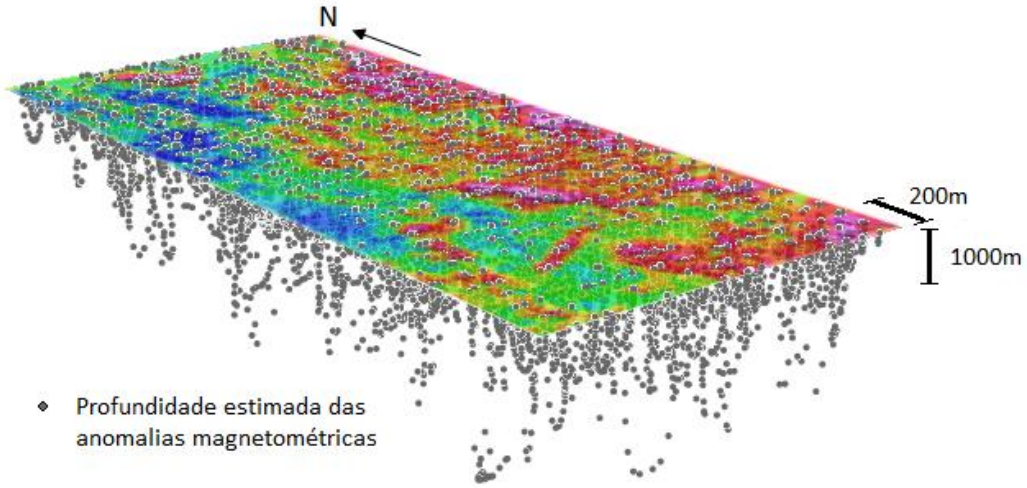


Figura 5.5: Visualização no ArcScene dos dados das anomalias magnetométricas (relação anomalia-profundidade estimada) com base no mapa de Amplitude do Sinal Analítico. Exagero vertical de 5x.

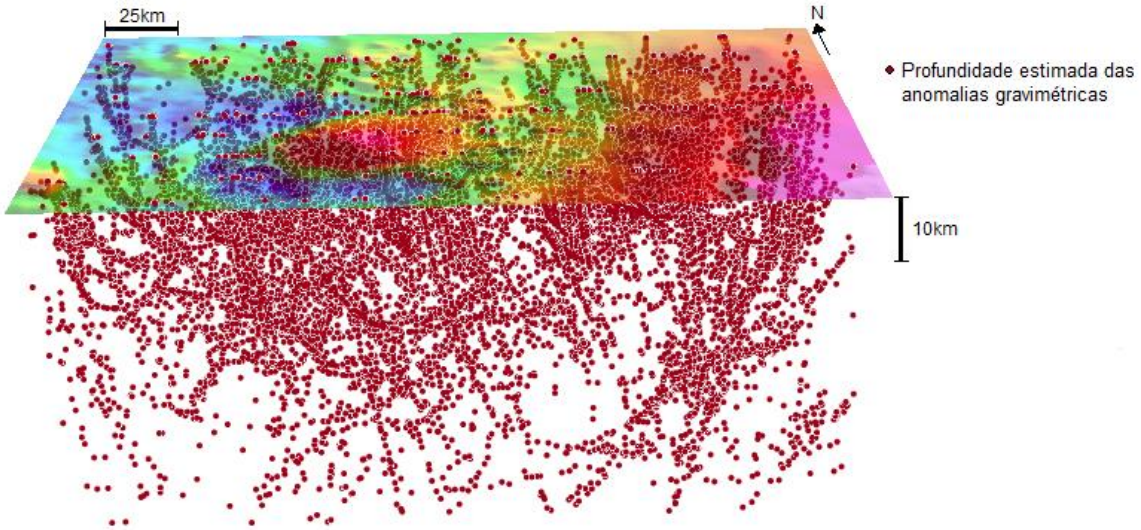


Figura 5.6: Visualização no ArcScene dos dados das anomalias gravimétricas (relação anomalia-profundidade estimada) com base no mapa Bouger. Exagero vertical de 3x.

Abaixo é possível se ter uma visão geral de todas as etapas da deconvolução até o resultado final em três dimensões. A título de exemplo, foi escolhido o perfil 11 da modelagem magnetométrica local. Este perfil é interessante pois atravessa três domínios magnetométricos distintos, com valores aumentando sentido leste e com uma anomalia expressiva ao centro.

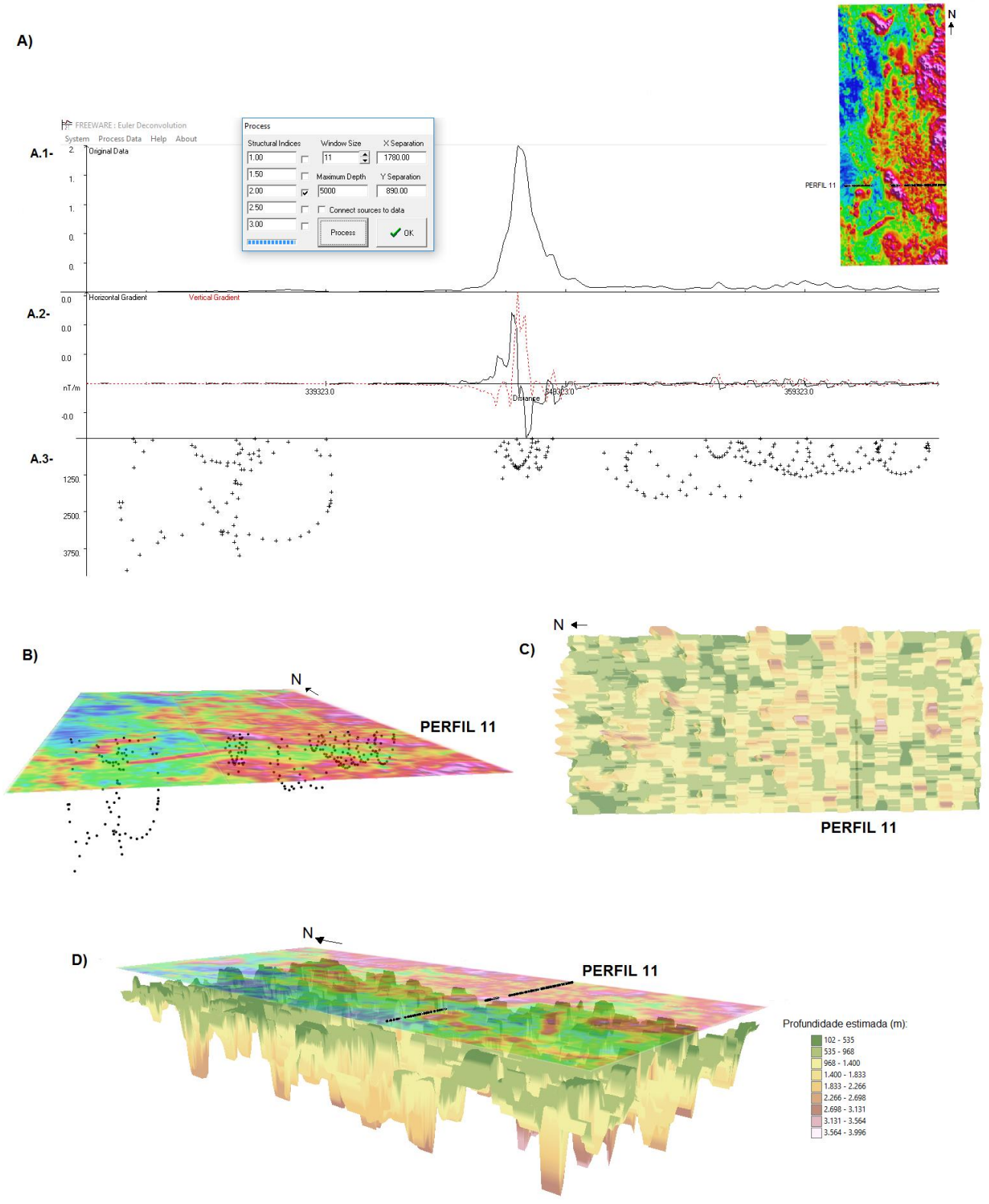


Figura 5.7: Visualização do processo de modelagem local. (A) Respostas da deconvolução de Euler no software Euler 1.0; (B) Visualização da inversão do Perfil 11sobre o mapa magnetométrico ASA; (C) Visão em planta do modelo 3D e (D) Visão geral do modelo magnetométrico 3D local, com o mapa ASA sobreposto.

Na Figura 5.7-A é possível ver a localização do perfil sobre o mapa ASA e as respostas do mesmo no *software* Euler 1.0. Os dados magnetométricos originais são vistos em A.1, os gradientes vertical e horizontal em A.2 e os dados de inversão em A.3. É interessante notar que a região da anomalia magnetométrica mais expressiva tem sua fonte geradora localizada em profundidade rasa, em torno de 1.250 m (A.3). Em seguida tem-se imagens do *software* ArcScene onde os mesmos dados de inversão anteriores são vistos em 5.7-B. O modelo a partir da krigagem é apresentado em planta (5.7-C), evidenciando que a região com as anomalias em maior profundidade estão à oeste do perfil. Por fim, em 5.7-D tem-se uma visão geral do modelo sobreposto pelo mapa de Amplitude do Sinal Analítico.

Em seguida tem-se mais uma vez o modelo 3D da área de estudo local, onde foram interpretados os principais lineamentos (Figura 5.8-A) e comparados com os lineamentos traçados na análise qualitativa (Cap. 4) (Figura 5.8-B). É notável a grande semelhança entre as interpretações e a persistência da expressão dos lineamentos da Faixa Colatina, com direção NNW-SSE.

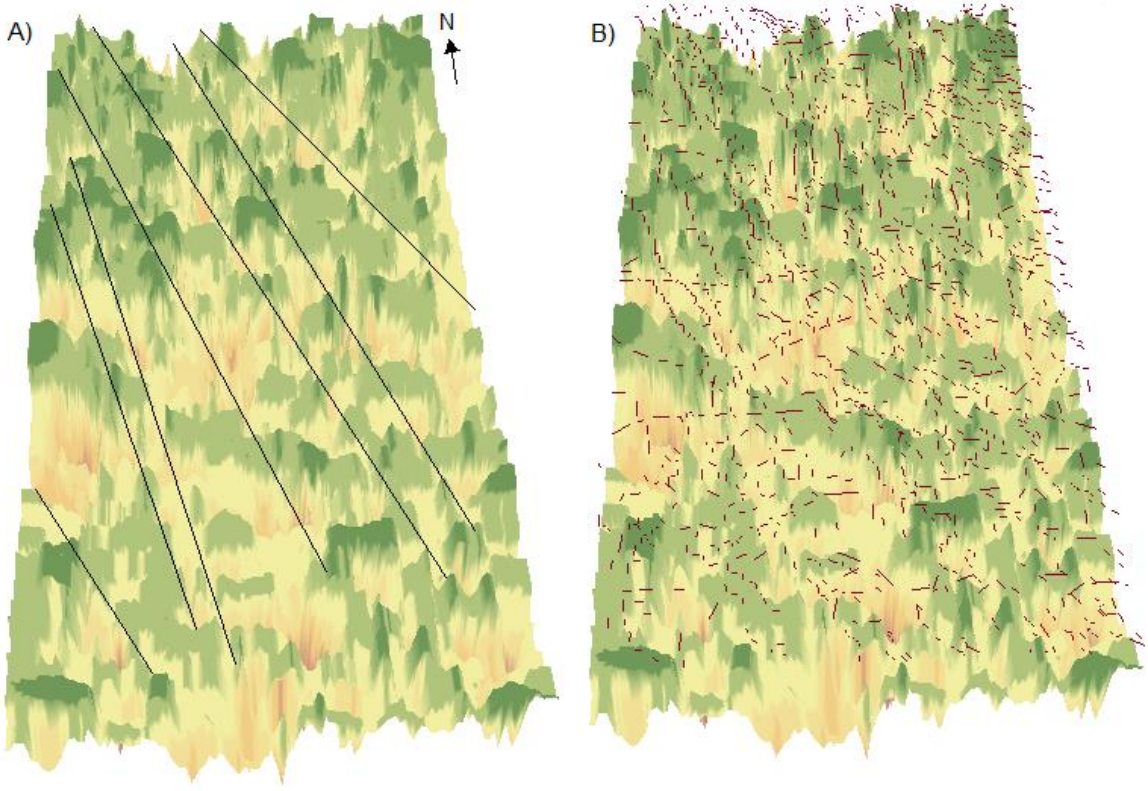


Figura 5.8: Interpretação dos lineamentos pela análise quantitativa (A) e análise quantitativa (B) sobre o modelo magnetométrico 3D da área de estudo de detalhe.

CAPÍTULO 6

INTEGRAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA

6.1. INTRODUÇÃO

Apresentam-se aqui os resultados da integração geológico-geofísica, correlacionando os mapas geofísicos (magnetometria, gravimetria e radiometria) com os mapas geológicos e imagem de satélite (SRTM), em escala regional e local. Para facilitar a integração e por sua maior abrangência, será utilizado o mapa geológico com litologias simplificadas, cuja versão digital foi obtida do Geobank/CPRM (Folhas SE-24 (Rio Doce) e SF-24 (Vitória) - Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo). Para fins de complementação, será utilizado na análise local o mapa geológico que enfoca exclusivamente o Feixe de Lineamentos Colatina (Alkmim *et al.* 2013).

6.2 ANÁLISE REGIONAL

Nos mapas apresentados a seguir é possível ter uma visão regional da área enfocada, comparando-a com os limites da área de estudo local (marcada pelo retângulo central nos mapas). A área regional possui cerca de 42.660 km² e abrange a porção centro-sul do Estado do Espírito Santo (Figura 6.1), e parte do Estado de Minas Gerais (à leste). Dada sua grande extensão é possível visualizar feições variadas.

Na imagem de satélite SRTM (Figura 6.2) destaca-se, a norte da área de estudo, o traçado W-E bem marcado do leito do Rio Doce até sua foz, feição também observada no mapa geológico (Figura 6.3). Além disso, é possível identificar duas direções de lineamentos principais: uma NE-SW e outra NW-SE (destacada na imagem), que é a mesma do Feixe de Lineamentos Colatina. Por se tratar de uma área predominantemente marcada por rochas ígneas, notam-se na imagem de satélite, feições de aspecto circular que correspondem a intrusões graníticas. Como exemplo, pode-se citar a intrusão a extremo sudoeste, nos municípios de Ibitirama e Dores do Rio Preto, que é identificada no mapa geológico (Figura 6.3) por “enderbitos, noritos e kinzigitos” (unidade Caparaó) e que também aparece nos mapas geofísicos (Figuras 6.6 e 6.8). A Figura 6.4 mostra a comparação dessa feição na imagem SRTM e mapas geológico, gravimétrico e magnetométrico.

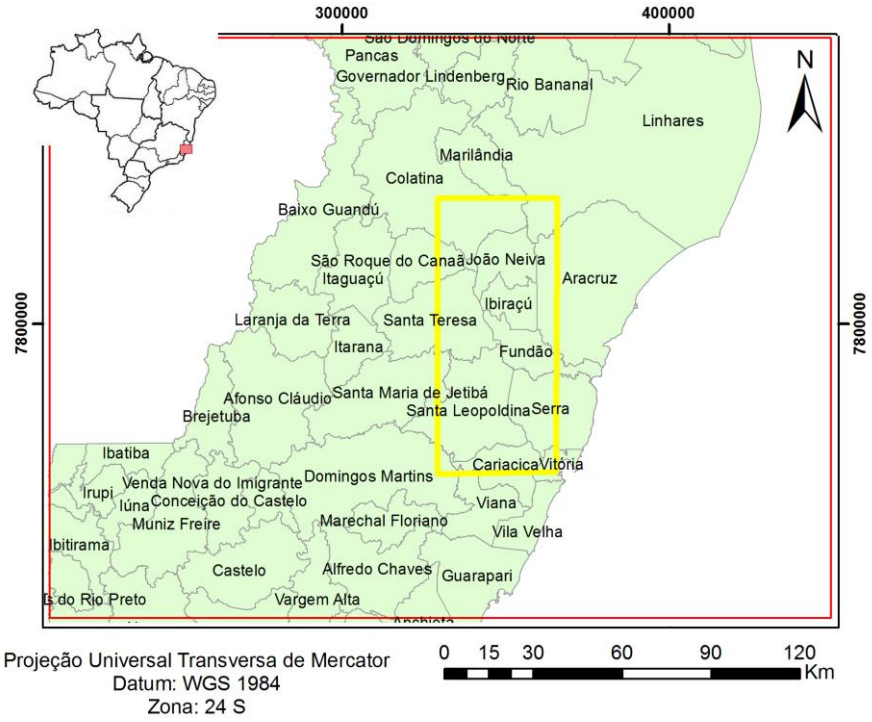


Figura 6.1: Área regional com limites de municípios do Espírito Santo e área de estudo de detalhe marcada ao centro. Modificado de IJSN-ES (2016).

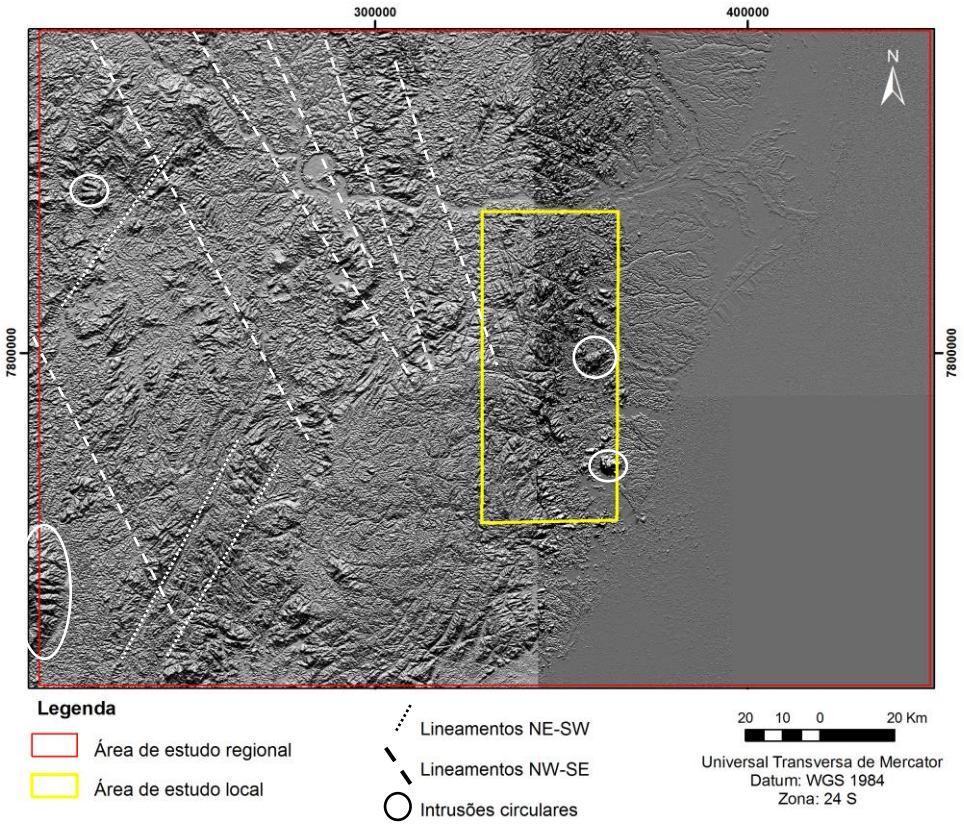


Figura 6.2: Imagem de satélite SRTM regional com as áreas de estudo e exemplos de lineamentos e intrusões circulares destacados. Modificado de INPE (2016).

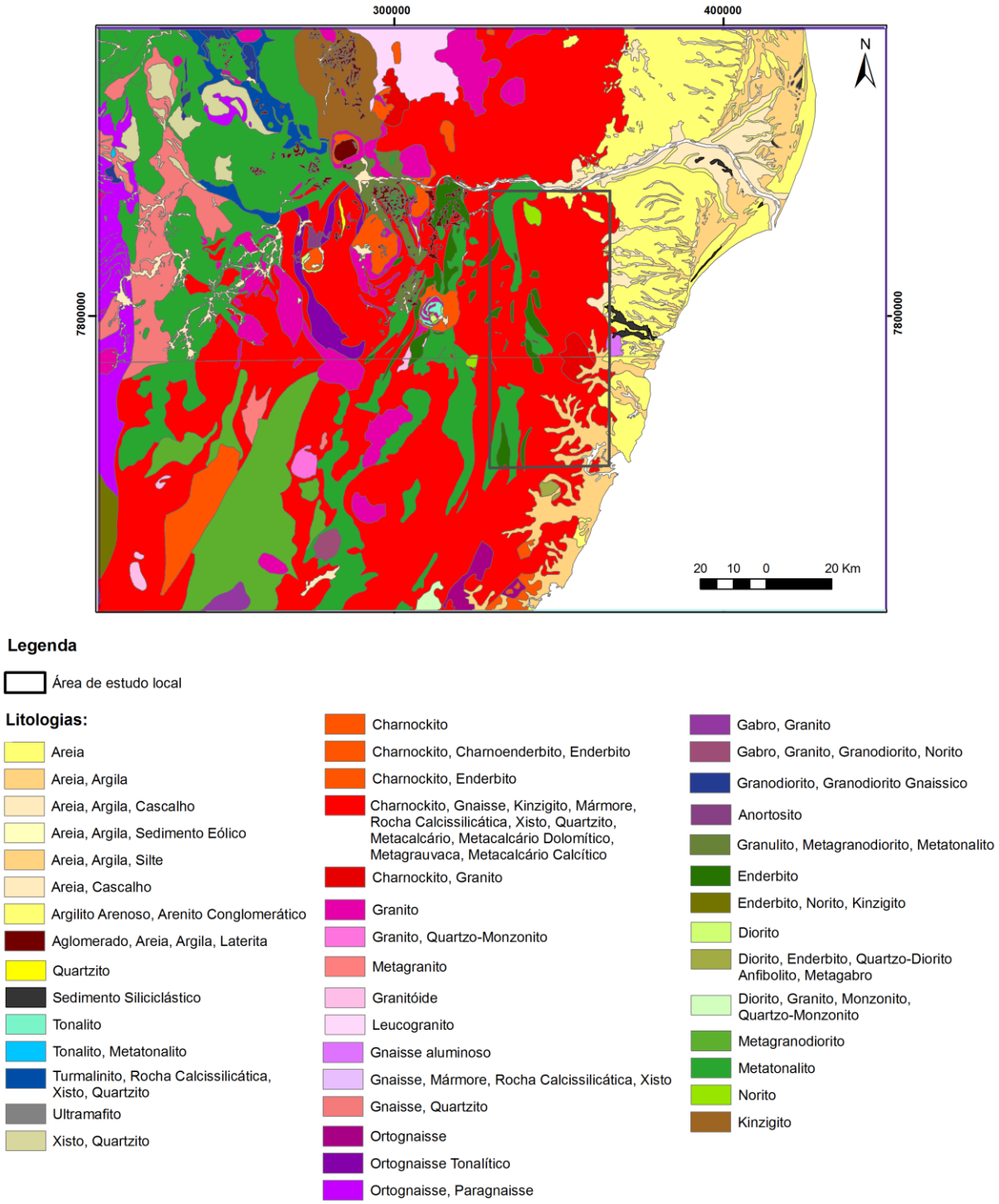


Figura 6.3: Mapa geológico simplificado com os principais litotipos da área regional. Fonte: Adaptado de CPRM, Folhas SE-24 (Rio Doce) e SF-24 (Vitória). Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo.

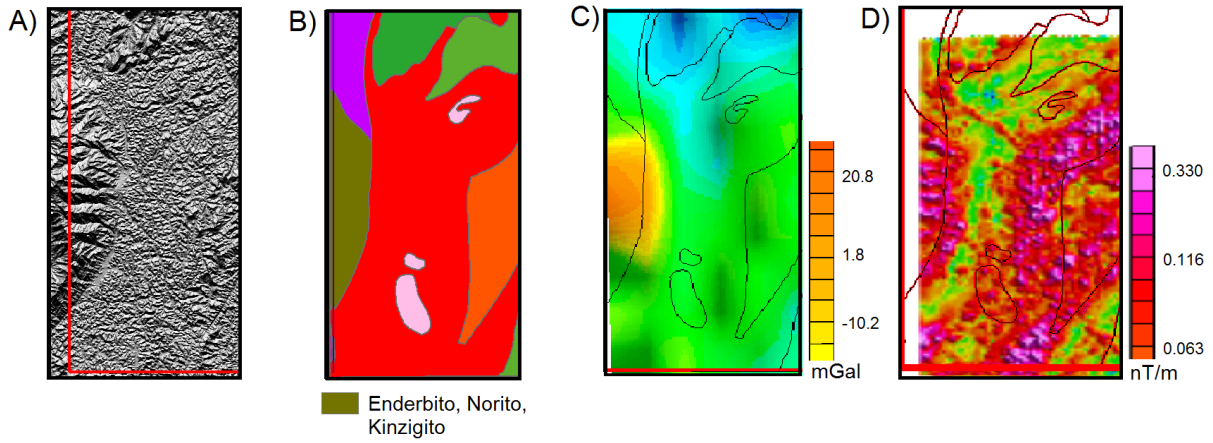


Figura 6.4: Expressão da mesma feição na imagem SRTM (A), mapa geológico (B) e mapa gravimétrico Bouger (C) e mapa magnetométrico ASA (D) sobrepostos pelo contorno geológico.

O mapa gravimétrico regional (Figura 6.6) mostra a intrusão citada acima (Figura 6.4) em coloração amarelada (-13 a 8 mGal), mas o que realmente chama atenção é a região de altos valores gravimétricos – de alta densidade (25 a 150 mGal) - em toda porção leste. Tais anomalias correspondem: (i) ao grande aporte de sedimentos que chega à foz do Rio Doce; e, (ii) marcam o limite entre crosta continental e crosta transicional nas bordas do continente.

Além disso, destaca-se a presença de uma expressiva anomalia circular (Figura 6.5) no meio do mapa (à esquerda da área de estudo local).

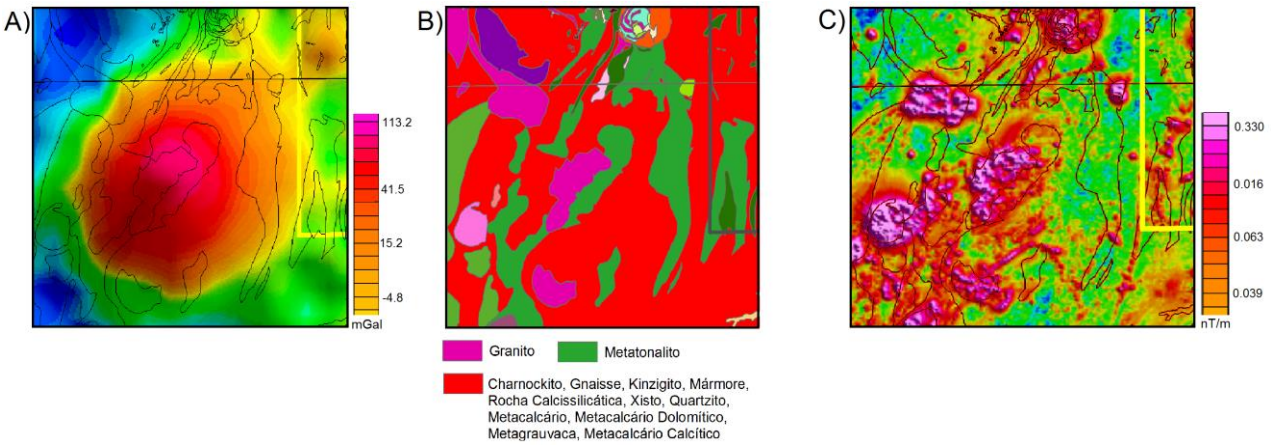


Figura 6.5: Expressão da anomalia circular no mapa gravimétrico Bouger (A), mapa geológico (B) e mapa magnetométrico ASA (C). O contorno geológico foi colocado sobre nos mapas geofísicos para facilitar a comparação.

Correlacionando tal anomalia com o mapa geológico percebe-se que o seu centro, área com valores gravimétricos altos (<90 mGal), é mapeado como um granito, conhecido como "Maciço Garrafão". As áreas ao redor correspondem a metatonalitos e litologias pertencentes à Unidade Paraíba do Sul (unidades terrígenas com intercalações carbonáticas) que é o grupo de litologias e que predomina em toda porção central do mapa geológico regional (Figura 6.3). Pode ser observado, ainda, que a anomalia circular é cortada pelos perfis 3 e 4 (Figura 6.6) utilizados na Deconvolução de Euler.

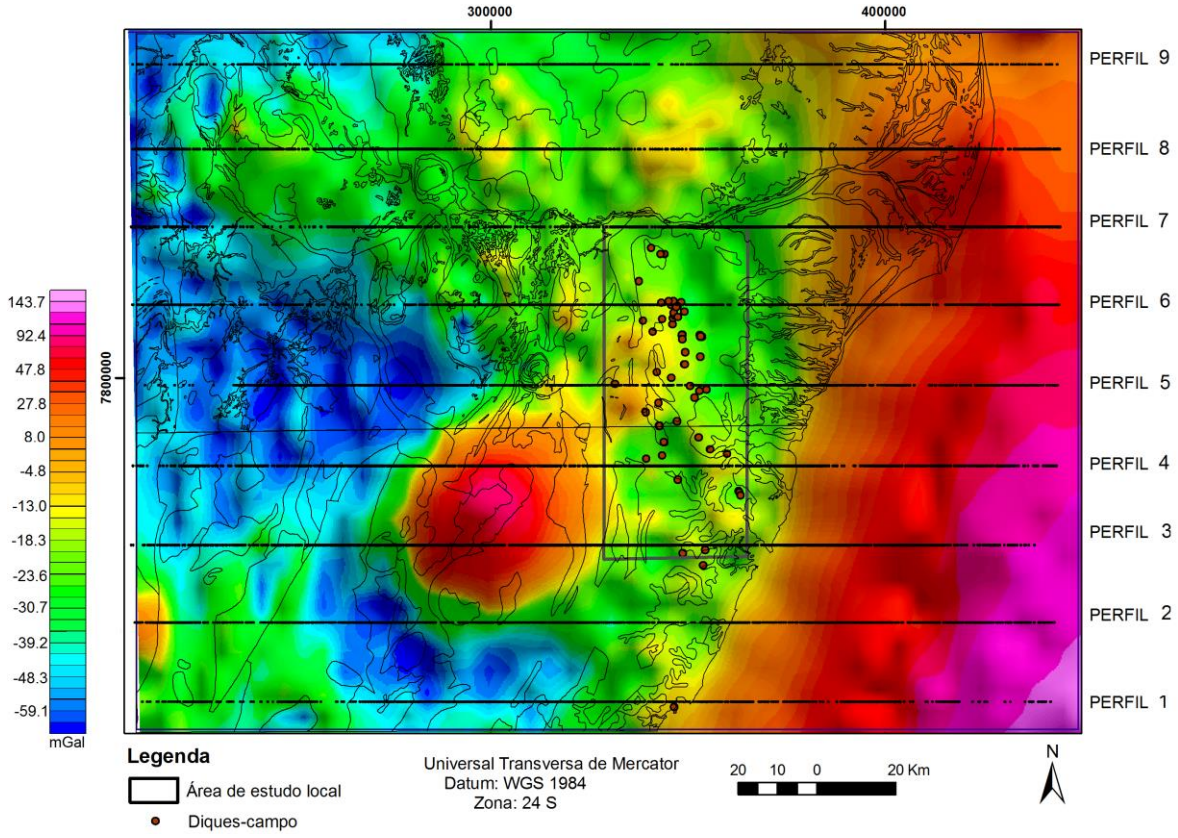


Figura 6.6: Mapa gravimétrico Bouger superposto ao mapa geológico e com os perfis de deconvolução, área local e diques mapeados em campo (Alkmim *et al.* 2013) identificados.

A princípio, imaginou-se que tal anomalia poderia estar diretamente relacionada aos diques mapeados na área de estudo de detalhe (indicados na figura acima), podendo ser uma possível fonte geradora dos mesmos em profundidade. Entretanto, a Figura 6.7 abaixo (com base no perfil 3 – Figura 6.7-B) mostra que tal anomalia (área destacada) possui uma fonte

superficial (aproximadamente 15 km de profundidade) quando comparada com as regiões em seu entorno (Figura 6.7-C).

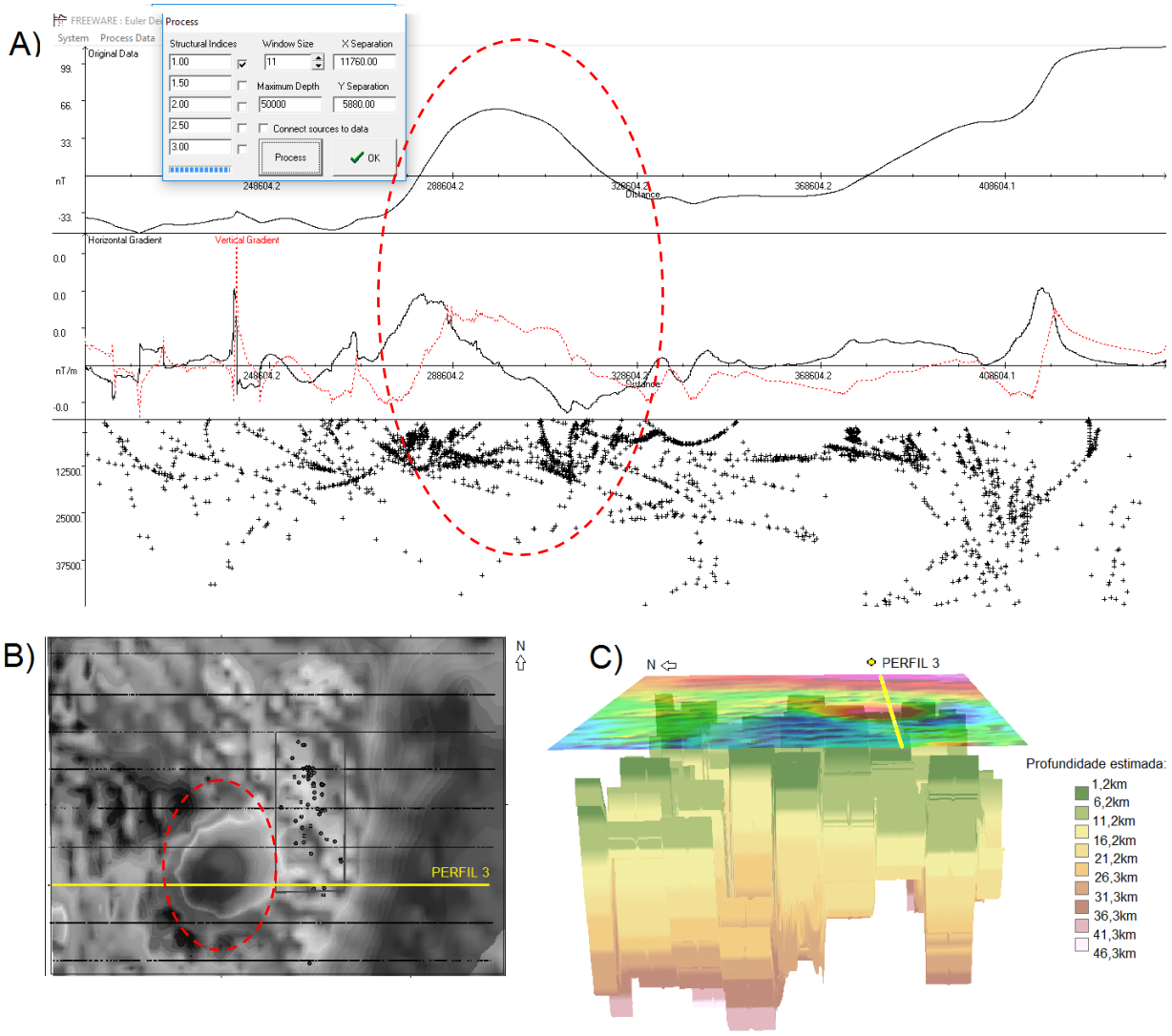


Figura 6.7: A) Dados do perfil 3 gerado no *software* Euler 1.0 composto de três partes (de cima para baixo): dados das anomalias gravimétricas do mapa Bouger, gradientes verticais e horizontais e repostas das fontes das anomalias em profundidade; B) Localização do Perfil 3 no mapa gravimétrico Bouger regional e C) Modelo de krigagem 3D, feito a partir da Deconvolução de Euler do mapa gravimétrico Bouger, mostrando a profundidade estimada do topo das anomalias gravimétricas.

Já o mapa magnetométrico ASA regional (Figura 6.8) apresenta uma estreita correlação com o mapa geológico (Figura 6.3), principalmente com relação às intrusões circulares graníticas e charnockíticas de elevados valores magnetométricos. Neste mapa, a área de anomalia gravimétrica mostrada na Figura 6.5 também é marcada por intrusões

circulares com valores maiores que 0.070 nT/m, sendo possível localizar o granito do "Maciço Garrafão".

É interessante notar que o mapa abaixo, diferentemente dos anteriores, está representado além da área de estudo regional. Tal representação tem o intuito de ressaltar a expressão do Feixe de Lineamentos Colatina (direção NW-SE), já indicada na imagem SRTM, e muito bem marcada na porção noroeste do mapa e com prolongamento até a porção NW da área de estudo local.

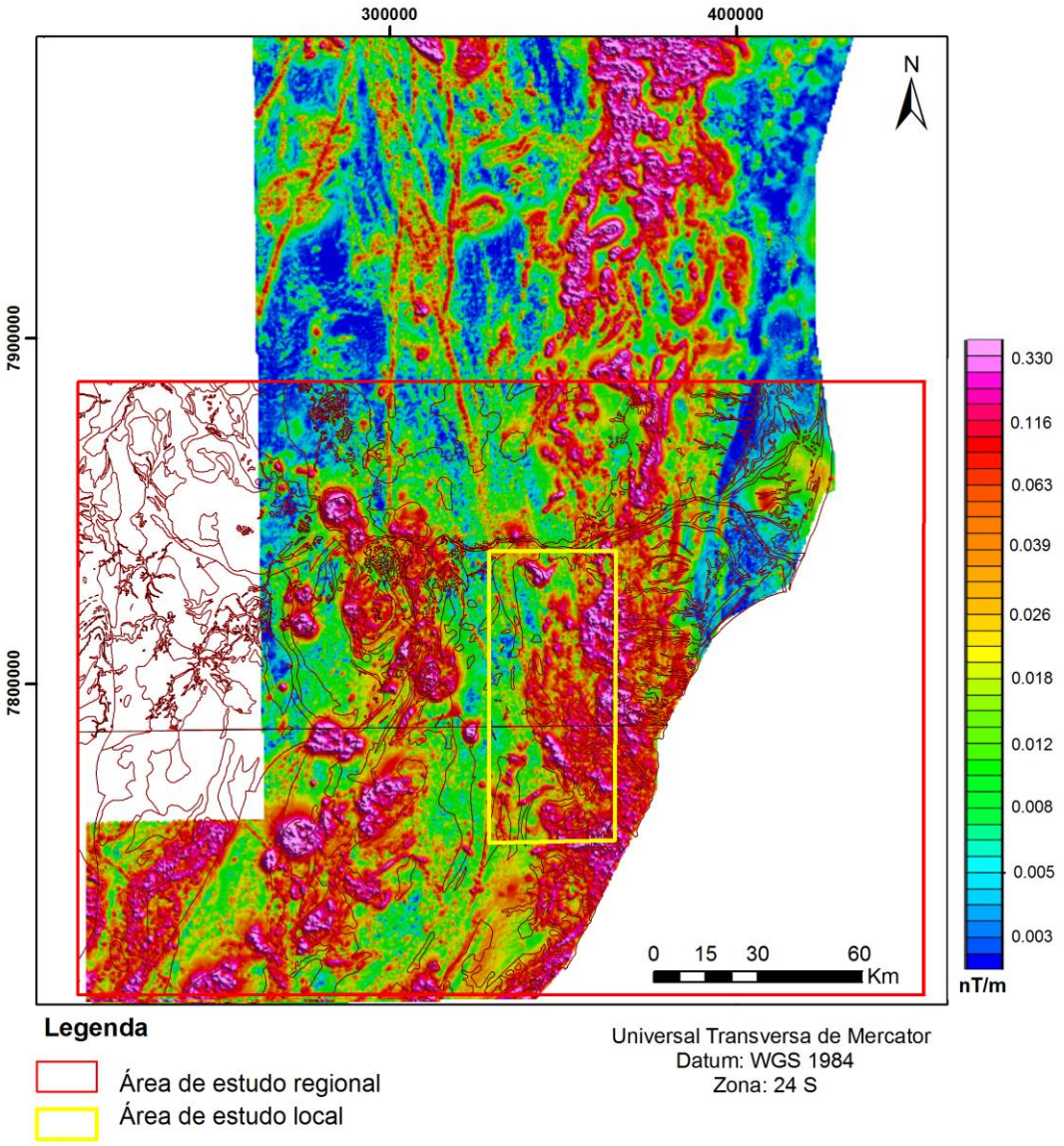


Figura 6.8: Mapa magnetométrico de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) superposto ao mapa geológico regional e com as áreas de estudo regional e local delimitadas.

A Figura 6.9 mostra a expressão dos lineamentos Colatina em todos os mapas magnetométricos.

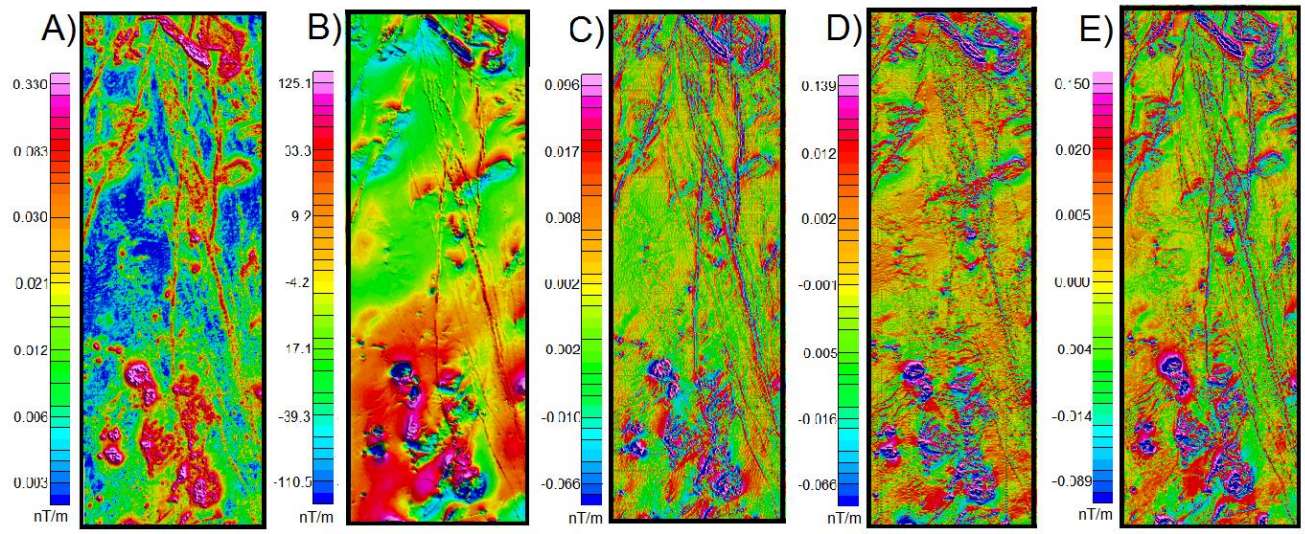


Figura 6.9: Feixe de lineamentos Colatina (direção NW-SE) expresso nos mapas magnetométricos: A) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); B) Campo Anômalo; C) Derivada em X (DX); D) Derivada em Y (DY) e Derivada em Z (DZ).

6.3 ANÁLISE LOCAL

Na análise local buscou-se enfatizar as relações entre a expressão dos lineamentos Colatina com os diques mapeados em campo e demais feições aparentes nos mapas geológico-geofísicos. Começando pela imagem de satélite (SRTM), percebe-se a grande correlação desta com o mapa magnetométrico de derivada em Z (Figura 6.11). Em ambos a direção dos feixes é notável e coerente com a análise feita no capítulo 4 “N10°W” e com a descrição dos diques encontrada na literatura “N15°W” (Roncato *et al*. 2011), “NNW” (Alkmim *et al.* 2006). Abaixo, tem-se a roseta com a direção de lineamentos principal encontrada pela análise qualitativa neste trabalho.

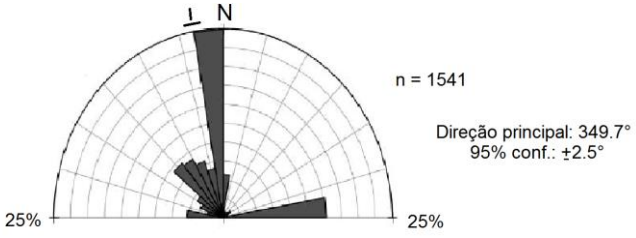


Figura 6.10: Roseta com as principais direções de lineamentos encontradas na análise dos mapas magnetométricos.

Além da direção principal, cabe ressaltar que existe outro esforço W-E, que parece muitas vezes "romper" a direção NW-SE dos feixes. Isso sugere uma relação temporal posterior à direção de lineamentos principal e pode estar relacionado ao contexto tectônico de abertura do oceano Atlântico. Mais uma vez, cabe destacar também a presença de lineamentos NE-SW.

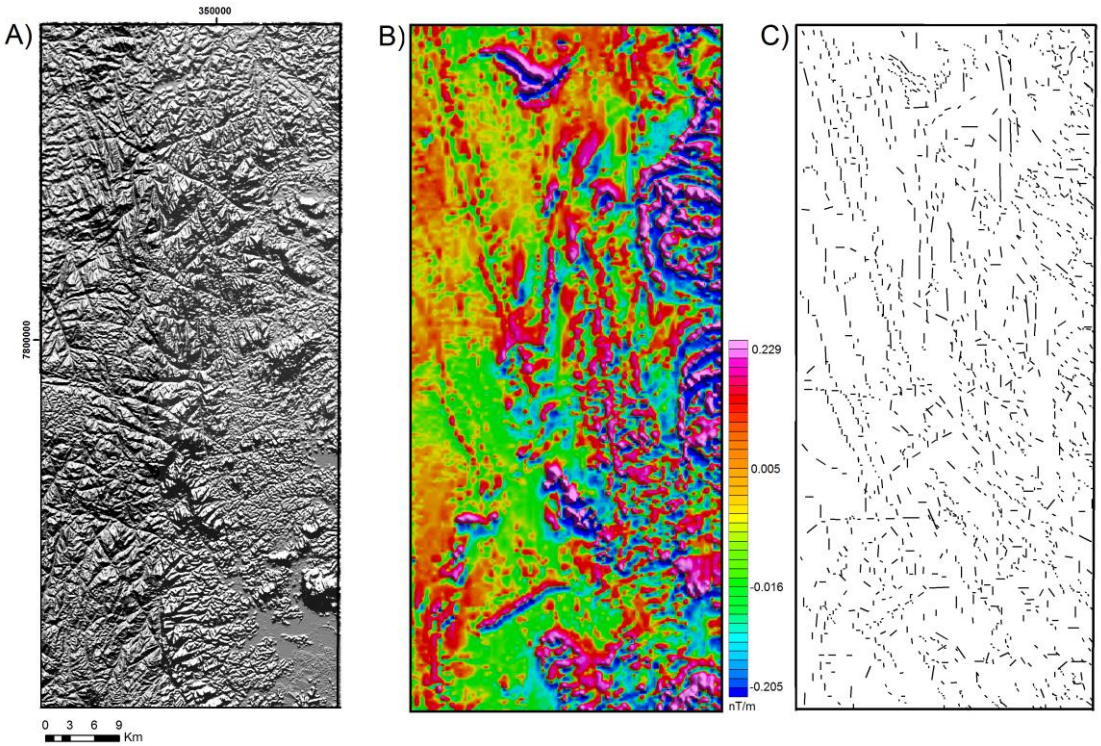


Figura 6.11: Comparação entre imagem SRTM (A), mapa magnetométrico DZ (B) e lineamentos traçados na análise qualitativa descrita no capítulo 4 (C).

A Figura 6.12 mostra o mapa dos principais litotipos encontrados na área de estudo (6.12-A) e o mapa geológico exclusivamente da área do Feixe de Lineamentos Colatina (Alkmim *et al.* 2013) (6.12-B). Comparando os dois, é possível observar que a maior parte dos diques mapeados em campo encontra-se alojada na unidade de litotipos terrígenos com intercalações carbonáticas (charnockitos, gnaisse, kinzigito, mármore, rocha calcissilicática, xisto, quartzito, metacalcário, metacalcário dolomítico, metagrauvaca, metacalcário calcítico) que corresponde aos granada-biotita granitos da Suíte Ataléia (Supersuíte G2), descritos no mapa de maior detalhe.

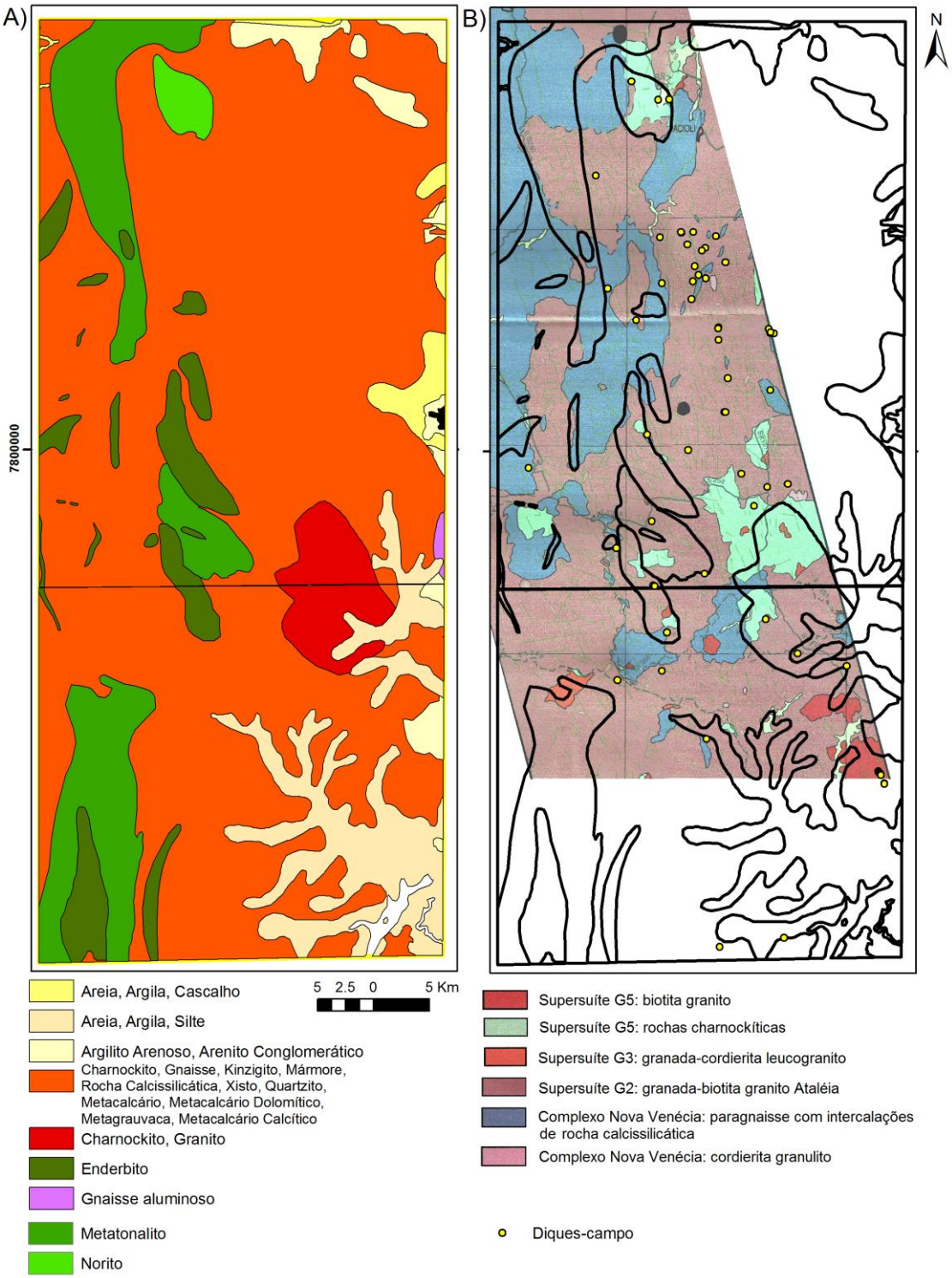


Figura 6.12: Correlação entre (A) mapa de litotipos de escala regional (Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo/CPRM) e (B) mapa geológico de detalhe do Feixe Colatina (Alkmim *et al.* 2013).

Analisando os mapas dos métodos potenciais sobrepostos pelos contornos litológicos (Figura 6.13) é possível identificar importantes correlações.

No mapa magnetométrico ASA nota-se uma maior afinidade das anomalias com os domínios litológicos do mapa geológico regional (Figura 6.13-A1). É nítida a relação entre as unidades charnockíticas e noríticas com altos magnetométricos, o que é esperado devido à presença de magnetita como mineral acessório nessas rochas. Já na análise pelo mapa litológico do Feixe Colatina (Figura 6.13-A2) nota-se, mais uma vez, a correspondência das altas anomalias com charnockitos (Supersuíte G5), além de relações com intrusões de biotita-granitos das Supersuítes G2 e G5.

No mapa gravimétrico Bouger, observa-se uma melhor correlação com o mapa litológico do Feixe Colatina (Figura 6.13-B2). Nele, é possível relacionar à região de grande densidade local, a oeste da área, aos granada-biotita granitos da Suíte Ataléia (Supersuíte G2). Além disso, podem-se associar altos gravimétricos com charnockitos e biotita granitos da Supersuíte G5. Por sua vez, a comparação com o mapa geológico regional (Figura 6.13-B1), mostra que a grande maioria dos altos valores de gravimetria se relaciona à Unidade Paraíba do Sul (de litologias variadas), embora sejam possíveis também correlações com enderbitos e noritos.

Ademais, observa-se que os diques aflorantes da Suíte Fundão concentram-se em áreas de altas anomalias magnetométricas e gravimétricas. No caso da magnetometria, a clara exposição dos diques, segundo o *trend* do Feixe Colatina NNW-SSE, provavelmente se deve à sua composição predominantemente basáltica e a um enriquecimento supergênico e superficial nos diques, dado elevado grau de intemperismo em que se encontram. Para gravimetria, os diques em altas anomalias estão sobre áreas graníticas ou gnáissicas, as quais tendem a dar respostas gravimétricas positivas devido a alta densidade dessas rochas.

Independentemente das litologias, é importante ressaltar o *trend* NW-SE comum em ambos os mapas de métodos potenciais.

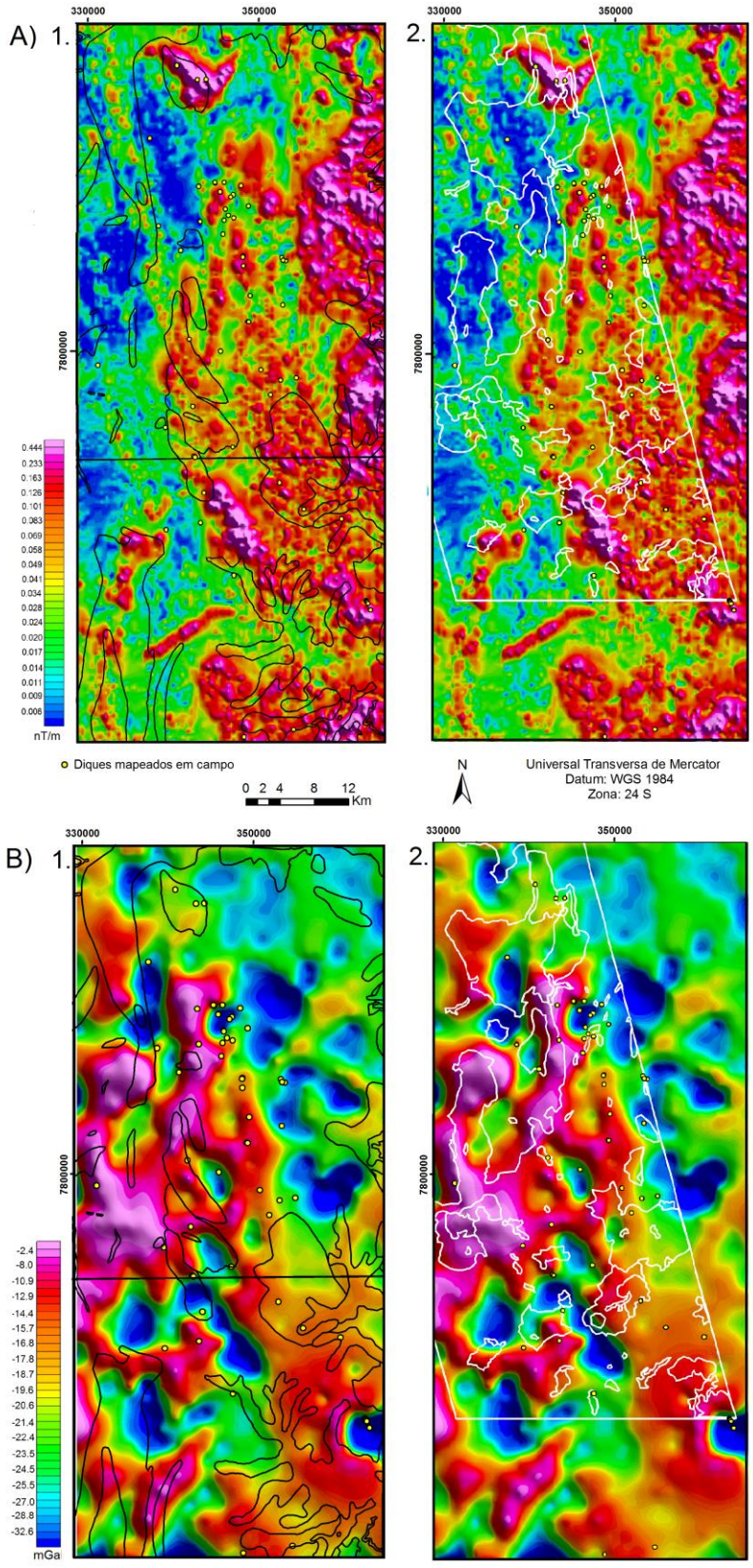


Figura 6.13: Mapa magnetométrico ASA (A) e mapa gravimétrico Bouger (B) sobrepostos pelo contorno litológico do mapa geológico regional (A.1 e B.1) e do mapa do Feixe Colatina (A.2 e B.2).

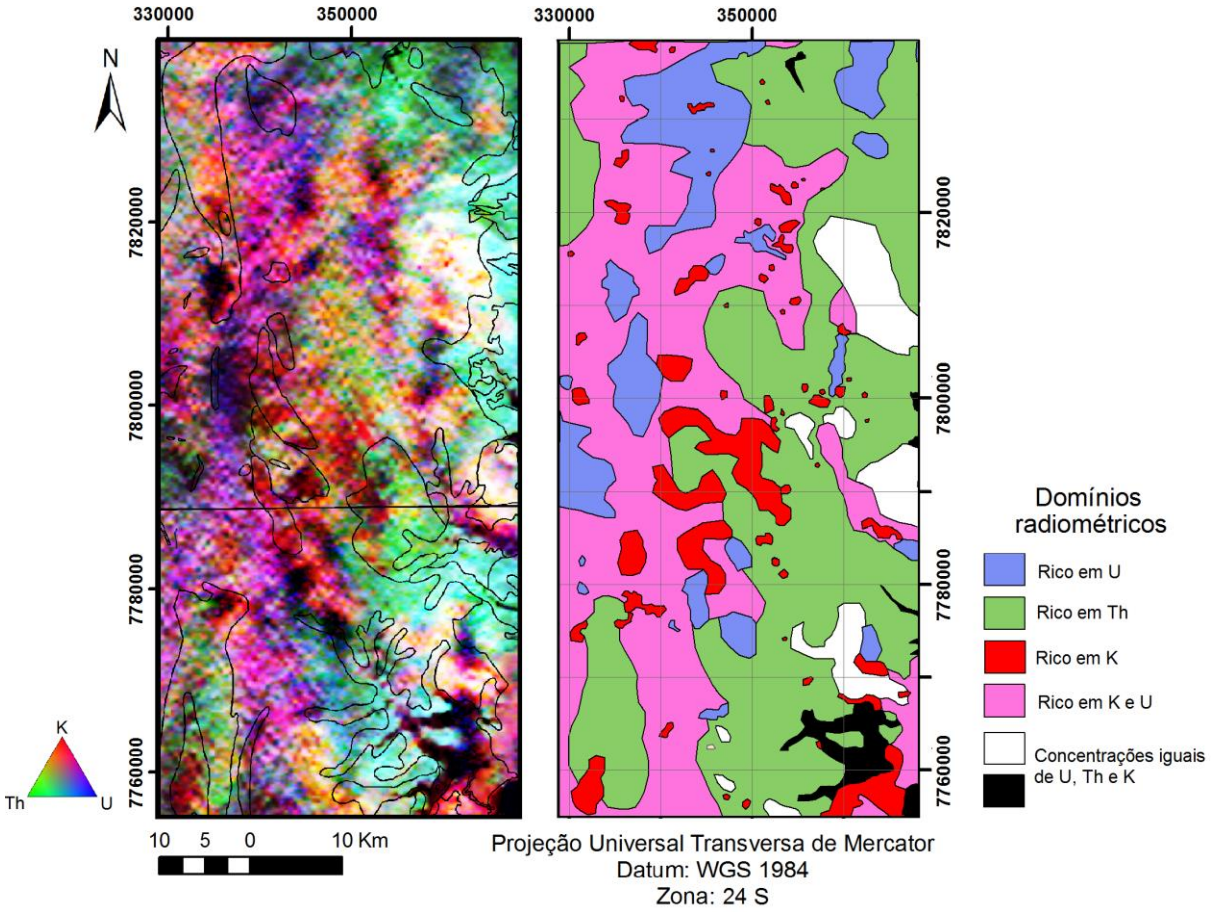


Figura 6.14: Imagem ternária RGB sobreposta pelos contornos litológicos do mapa geológico regional (à esquerda) e mapa de domínios radiométricos(à direita).

A imagem ternária radiométrica, por sua vez, também possui boa correlação com o mapa geológico regional. A Figura 6.14 mostra os contornos litológicos sobre o mapa ternário e, ao lado, as radiofacies interpretadas na análise qualitativa. Nota-se a correspondência entre altos valores de potássio (K) e urânio (U) em corpos mapeados como enderbitos e noritos e maiores valores de tório (Th) em metatonalitos. É possível ainda identificar a proporção equilibrada (de abundância ou ausência) dos três isótopos – K, U e Th - nas porções sedimentares de formado ramificado, à leste. Ademais, considerando o decaimento radioativo de urânio para tório, pode-se dizer que, de maneira geral, às rochas localizadas a leste tendem a ser mais antigas do que aquelas à oeste, dada as maiores concentrações de Th e U, respectivamente.

Outra feição destacada nos mapas é o norito “São Gabriel da Baunilha”, com um formato semelhante a um “v”, localizado na porção centro-norte da área de estudo e onde foram mapeados três diques aflorantes da Suíte Fundão. Assim como a intrusão exemplificada na Figura 6.4, esta feição também é facilmente observável nas diversas análises (Figura 6.15), tendo uma resposta positiva na magnetometria (A), sendo classificado como norito no mapa geológico regional (B) e “charnockito” no mapeamento de detalhe (C), representando um pequeno aumento de densidade na gravimetria (D) e possuindo picos de potássio e urânio na radiometria (E). Além disso, é possível identificação, na anomalia magnetométrica, de duas direções de lineamentos (Figura 6.15-A), uma principal NW-SE e outra secundária NE-SW.

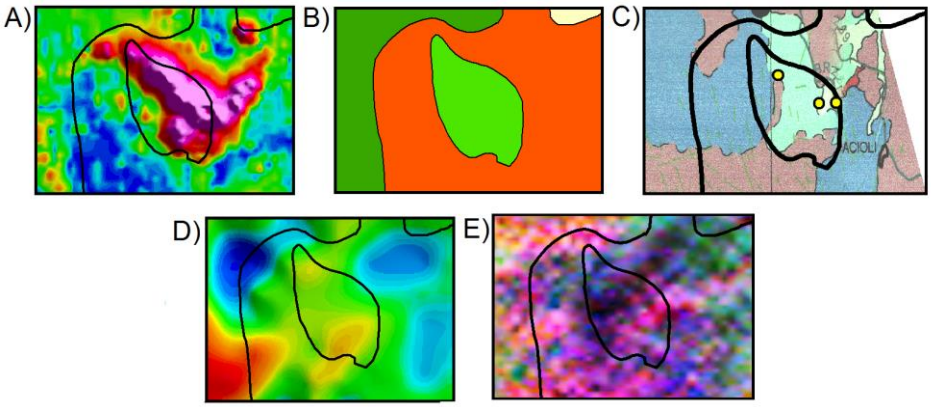
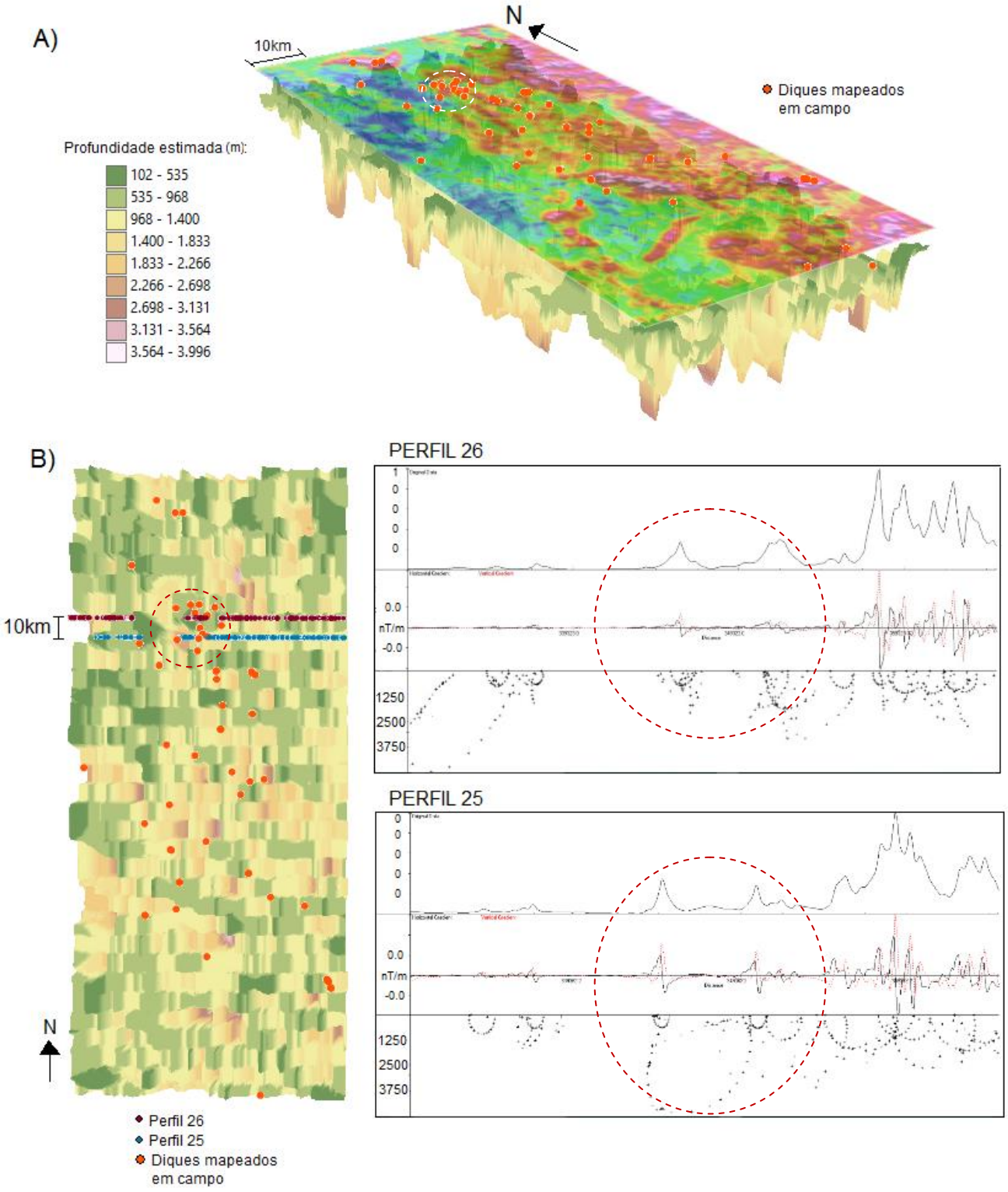


Figura 6.15: Respostas do “norito” São Gabriel da Baunilha nos diferentes mapas: (A) magnetométrico (ASA); (B) geológico (Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo/CPRM); (C) geológico do Feixe de Lineamentos Colatina (adaptado de Alkmim *et al*. 2013); (D) gravimétrico Bouger e (E) imagem ternária RGB.

Por fim, a Figura 6.16 mostra o modelo 3D da região de estudo, obtido através da krigagem dos dados magnetométricos. Mais uma vez fica claro que o topo das fontes geradoras das anomalias magnetométricas é raso, não ultrapassando 4 km (Figura 6.16-A). Os diques de basalto aflorantes também são indicados na figura e, ainda que estes estejam associados a regiões de grandes anomalias, eles por si só não compõem anomalias expressivas. No entanto, é possível ver a respostas dos diques nos perfis 25 e 26, marcadas nas áreas circuladas (Figura 6.16-B). Em 6.16-C é apresentada uma aproximação do modelo na qual é possível ver as respostas apresentadas anteriormente sob outra perspectiva. Nela é possível visualizar que estes diques acompanham a direção NNW do Feixe Colatina (marcada) e que, próximo à eles (à sul), existe um topo de uma fonte geradora localizada a cerca de 2,5 km de profundidade.


A)
N
10km
Diques mapeados em campo
Profundidade estimada (m):
102 - 535
535 - 968
968 - 1.400
1.400 - 1.833
1.833 - 2.266
2.266 - 2.698
2.698 - 3.131
3.131 - 3.564
3.564 - 3.996
B)
10km
N
Perfil 26
Perfil 25
Diques mapeados em campo
PERFIL 26
PERFIL 25
0.0
nT/m
-0.0
1250
2500
3750

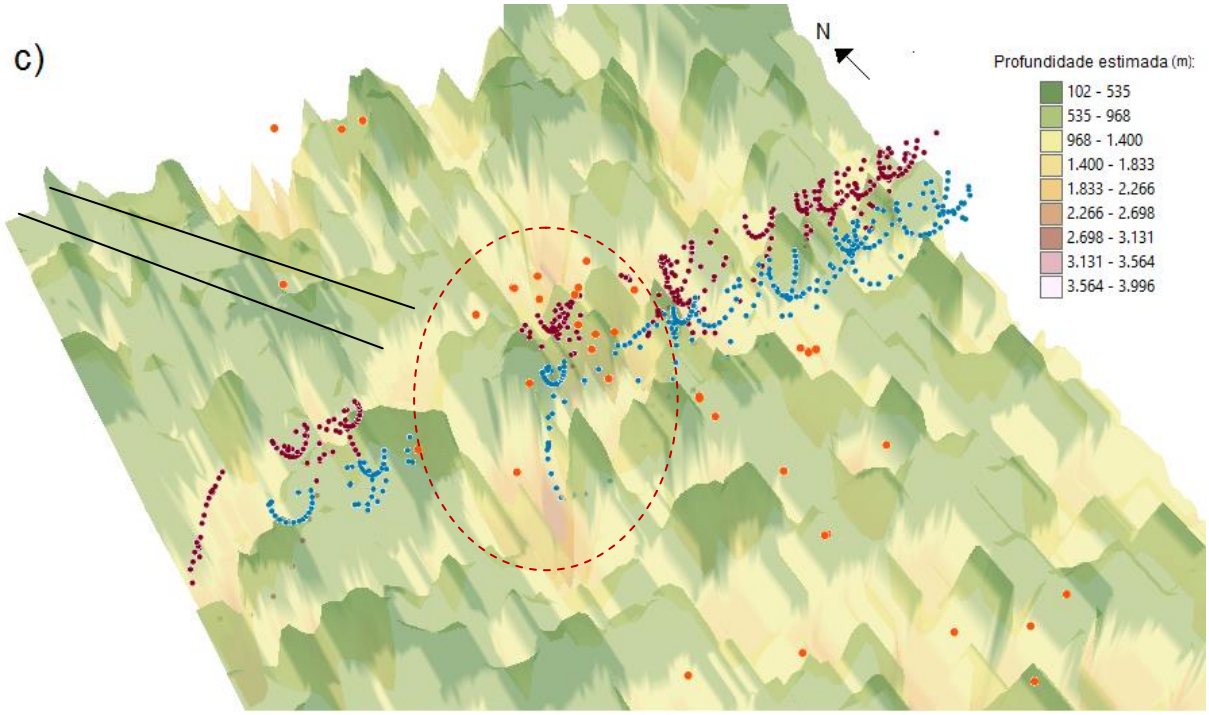


Figura 6.16: Modelo magnetométrico 3D da área de estudo de detalhe. (A) Modelo sobreposto pelo mapa magnetométrico ASA; (B) Visualização esquemática das respostas da Deconvolução de Euler dos perfis 25 e 26, que se encontram na região com maior concentração de diques; (C) Aproximação do modelo na região com maior incidência de diques e resposta dos perfis 25 e 26.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diques da Suíte Fundão se concentram na porção sudeste do Feixe Colatina, local de grande ocorrência de plútons graníticos, charnockíticos e noríticos da Supersuíte G5 e onde destaca-se a facies granulito nos paragnaisses do Complexo Nova Venécia e granitos deformados da Supersuíte G2. A exposição de tais rochas de alto grau metamórfico, como sugere Belém (2014), denuncia a exposição de nível crustal mais profundo e permite dizer que a região de estudo sofreu uma elevada taxa de exumação. Neste sentido, seria razoável sugerir que o caráter superficial dos diques e dos Lineamentos do Feixe Colatina ocorre pois o que está exposto é apenas a "raiz" dos diques e, por isso, os mesmos não apresentam continuidade significativa em profundidade.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi a caracterização da geometria 3D do enxame de diques básicos característico do Feixe de Lineamentos Colatina. Como objetivos secundários propôs-se a estimativa da quantidade, distribuição espacial, volume e continuidade longitudinal dos diques, bem como a possível conexão com um corpo máfico maior em profundidade.

A partir da análise quali-quantitativa de dados geofísicos (gravimetria, magnetometria e radiometria), imagens de satélite e mapas geológicos foi possível a delimitar domínios, identificar lineamentos, bem como fazer correlações geológico-geofísicas e criar modelos 3D em escalas local e regional das áreas de estudo.

Assim como esperado, a expressão dos lineamentos do Feixe Colatina foi a feição mais marcante, identificável nas imagens de satélite, mapas magnetométricos, gravimétricos e na modelagem tridimensional. Foi possível confirmar a orientação NNW-SSE dos lineamentos, sendo importante ressaltar sua clara exposição no mapa magnetométrico regional de amplitude do sinal analítico e mapa com filtro de derivada vertical em Z, no qual são destacadas as estruturas de orientação N-S.

Os diques máficos da Suíte Fundão, entretanto, não apresentaram respostas tão expressivas quanto os lineamentos nos quais estes estão encaixados. De forma a se obter as melhores respostas foi selecionada como área de estudo local a região a sudeste do Feixe Colatina, onde está a maior concentração de diques aflorantes (mapeados em campo). E, com o intuito de achar uma possível fonte em profundidade de tais diques, uma grande área de estudo regional (42.660 km²) foi delimitada no entorno da área local.

A correlação entre anomalias magnetométricas locais e diques mapeados, por meio da Deconvolução de Euler e inversão de dados, mostrou que as fontes geradoras são superficiais, não ultrapassando, em geral, 2 km de profundidade. Como os diques em campo apresentam-se muito intemperizados, acreditou-se que os mesmos fossem gerar anomalias magnetométricas positivas devido a enriquecimento supergênico e residual. Entretanto, dada sua pequena dimensão (em geral, métrica), não foram observadas anomalias expressivas. Além disso,

acredita-se que o caráter superficial dos diques e Lineamentos seja devido ao enorme nível de exumação da região e consequente exposição de nível crustal profundo.

Na análise regional, foi encontrada uma expressiva anomalia circular, bem marcada no mapa gravimétrico Bouger e localizada a oeste da região de estudo local. A princípio, imaginou-se que tal anomalia pudesse estar relacionada com o enxame de diques, possuindo uma fonte localizada em grande profundidade. A modelagem 3D regional mostrou, contudo, que tal anomalia (mapeada como granito do "Maciço Garrafão") possui uma profundidade estimada de 12 km, que é superficial quando comparada com os demais dados gravimétricos da região que alcançam até 40 km.

Por fim, ainda que não tenha sido possível a caracterização em detalhe dos diques, a inversão de dados pela Deconvolução de Euler permitiu uma visualização da área sob uma perspectiva não observável em campo, fundamentando a geofísica como uma importante ferramenta na complementação do mapeamento geológico tradicional. Neste sentido, sugere-se o estudo aprofundado da região da anomalia gravimétrica citada anteriormente. Ainda que a mesma apresente correlação com intrusões graníticas evidenciadas no mapa magnetométrico ASA, não existe nenhuma outra região que possua uma densidade tão alta, embora existam muitas outras áreas de intrusões graníticas e com anomalias magnetométricas correspondentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz S., Whittington A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research* **149**: 43-64.

Alkmim, F.F.; Pedrosa-Soares, A.C; Roncato, J.; Gradim, C.; Belém, J.; Voll, E. 2013. *O Feixe de Lineamentos Colatina*. Rede de Estudos Geotectônicos - Petrobrás.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências.*, **7**:349-364.

Barbosa V.C.F. & Silva J.B.C. 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial. *Revista Brasileira de Geofísica*., **23**(3): 243-250.

Belém, Juliane. 2014. *Geoquímica, geocronologia e contexto geológico do magmatismo máfico associado ao Feixe de Fraturas Colatina, estado do Espírito Santo.* Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Tese de doutoramento, 154p.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil –. Folhas SE-24(Rio Doce) e SF-24 (Vitória). Projeto Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. GEOBANK. Disponível em: http://geobank.cprm.gov.br/. Acessado em: 24 jan 2016.

Fitzgerald D., Reid A.R., McLenerney P. 2004. New discrimination techniques for Euler Deconvolution. *Elsevier* **30**: 461–469.

Gradim C., Roncato J., Pedrosa-Soares A. C., Cordani U., Dussin I., Alkmim F. F., Queiroga G., Jacobsohn T., da Silva L. C., Babinski M. 2014. The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. *Brazilian Journal of Geology*, **44**(1): 155-180.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Catálogo de Imagens. Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/CDSR/. Acessado em: 11 out 2016.

IJSN - Instituto Jones dos Santos Neves. MAPAS. Disponível em http://www.ijsn.es.gov.br/mapas/. Acessado em: 17 nov 2016.

Instituto Jones dos Santos Neves. 2012. *Mapeamento geomorfológico do Estado do Espírito Santo.* Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Nota técnica, 19p.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de exploração*. Oficina de Textos, São Paulo, 438 p.

Lourenço, F. S. 2015. *O lineamento Piúma: características gerais e história evolutiva no cenário tectônico da Província Mantiqueira Setentrional e margem continental.* Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 125p.

Mello, C.L.; Rodrigues, H.B.; Hatushika, R.S. 2005. Tectônica quaternária e anomalias de drenagem na região centronorte do Espírito Santo. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: http: www.abequa.org.br/trabalhos/0288_claudio_mello.pdf. Acessado em: 12 set 2016.

Munhá, J.M.U; Cordani, U.G.; Tassinari, C.C.G.; Palácios, T. 2005. Petrologia e termocronologia de gnaisses migmatíticos da Faixa de Dobramentos Araçuaí (Espírito Santo, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências* **35**(1):123-134.

Noce, C.M, Pedrosa-Soares, A.C., Piuzana, D., Armstrong, R., Laux, J.H. Campos, C.M. & Medeiros, S.R. 2004. Ages of sedimentation of the kinzigitic complex and of a late orogenic thermal episode in the Araçuaí orogen, northern Espírito Santo State, Brazil: Zircon and monazite U-Pb SHRIMP and ID-TIMS data. *Revista Brasileira de Geociências*, **349**: 587-592.

Noce, C.M., Macambira, M.B. & Pedrosa-Soares, A.C. 2000. Chronology of Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí Belt, Eastern Brazil, based on single zircon evaporation dating. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 25-29.

Novais, L.C.C. Teixeira, L.B. Neves, M.T. Rodarte, J.B.M. Almeida, J.C.H. and C.M. Valeriano 2004. Novas ocorrências de diques de diabásio na faixa Colatina – ES: estruturas rúpteis associadas e implicações tectônicas para as bacias de Campos e do Espírito Santo. *Boletim de Geociências da Petrobrás* **12**(1): 191-194.

Pedrosa-Soares A. C., Noce C. M., Alkmim F. F., Silva L. C., Babinski M., Cordani U., Castañeda C. 2007. Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, **15**(1):1-16.

Pedrosa-Soares A.C., Alkmim F.F., Tack L., Noce C.M., Babinski M., Silva L.C., Martins Neto M.A. 2008. Similarities and diferences between the Brasilian and African counterparts of Neoproterozoic Araçuaí-West-Congo orogen. *In*: R. Pankhurst, R. Trouw, B.B. Brito Neves, M. de Wit (Eds.) West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region, Special Publications, *Geol. Soc. of London*, **294**:153-172.

Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M. & Pinto, C.P. 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**: 307-323.

Pedrosa-Soares, A.C.; Alkmim, F.F. 2011. How many rifting events preceded the development of the Araçuaí-West Congo orogen? *Geonomos* **19**(2), 244-251.

Portal do Governo do Estado do Espírito Santo. GEOGRAFIA. Disponível em: http://www.es.gov.br/EspiritoSanto/Paginas/geografia.aspx. Acessado em: 29 ago 2016.

Press F., Siever R., Groetzinger J., Jordan T.H. 2006. *Para Entender a Terra.* Artmed, Porto Alegre, 656p.

RADAMBRASIL, 1983. *Folhas 23/24 Rio de Janeiro/Vitória* V 32. Rio de Janeiro.

Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millet A.J., Somerton I.W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, **55**: 80-91.

Roncato, J., Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., Jacobsohn, T., Queiroga, G., Castañeda, C., Greco, S. & Fanning, M. 2007. Heterogeneidade deformacional da Suíte Carlos Chagas (Orógeno Araçuaí) e a idade U-Pb SHRIMP do Giallo Veneziano. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 10, Diamantina. SBGMG, *Resumos*.

Roncato, J.G., Gradim, C., Belém, J., Pedrosa–Soares, A.C. 2011. *Mapeamento do Feixe de Lineamentos Colatina entre Vitória e Ecoporanga.* Relatório interno. UFMG – CPMTC, Convênio RGEOTEC-PETROBRAS.

Salem, A.E.D. & Ravat, D. 2003. A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, **68**: 1952-1961.

Silva, G. M. 2015. *Análise geofísica do distrito diamantífero Abaeté (MG) e de suas possíveis fontes primárias.* Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Tese de doutoramento, 120p.

Silva, J. M. R.; Lima, M. I. C.; Veronese, V. F.; Ribeiro, R. N. J.; Rocha, R. M.; Siga, O. J. 1987. *Folha SE. 24 Rio Doce : geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra* v.34, ed.: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 544p.

Silva, L.C., Armstrong, R, Noce, C.M., Carneiro, M., Pimentel, M., Pedrosa-Soares, A. C., Leite, C., Vieira, V. S., Silva, M., Paes, V. & Cardoso-Filho, J. 2002. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Móvel Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**: 513-528.

Silva, L.C., McNaughton, N.J., Armstrong, R., Hartmann, L. & Fletcher, I. 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections. *Precambrian Research*, **136**: 203-240.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. 1990. *Applied Geophysics.* Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

Teixeira, L.B., Rodarte, J.B.M. 2003. *Datações de diques de diabásios na faixa Colatina.* Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. PDEXP. MB, Relatório Interno. 58p.

Thompson D.T. 1982. EULDPH. A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**: 31-37.

Uhlein, A.; Roncato, J.; Egydio-Silva, M.; Parizek-Silva, Y.M.; Alves, M. 2014. Geologia Petrologia e contexto geotectônico dos gnaisses da região de Colatina, Espírito Santo. *Geonomos*, **22**(1), 66-8.3.

University of California San Diego. *Satellite Geodesy*. Disponível em: http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi. Acessado em: 18 out 2016.

Valente, S.C., Duarte, B.P., Heilbron, M., Corval, A., Szatmari, P.2009. Litogeoquímica de diques de diabásio de Faixa Colatina, ES. *Geochimica Brasiliensis* , **23**(2): 177-192.

Vauchez, A., Egydio-Silva, M., Babinski, M., Tommasi, A., Uhlein, A. & Liu, D. 2007. Deformation of a pervasively molten middle crust: insights from the Neoproterozoic Ribeira-Araçuaí orogen (SE Brazil). *Terra Nova*, **19**: 278-286.