



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE GEOFÍSICA-ESTRUTURAL DA ZONA LIMÍTROFE ENTRE AS
PROVÍNCIAS GEOTECTÔNICAS SÃO FRANCISCO E MANTIQUEIRA NA PORÇÃO
SUDESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Mayko Elias Araújo Neves

MONOGRAFIA Nº 231

Ouro Preto, maio de 2017

ANÁLISE GEOFÍSICA-ESTRUTURAL DA ZONA LIMÍTROFE
ENTRE AS PROVÍNCIAS GEOTECTÔNICAS SÃO FRANCISCO
E MANTIQUEIRA NA PORÇÃO SUDESTE DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitor

Profª. Dra. Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tania Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Luís Antônio Rosa Seixas

MONOGRAFIA

Nº 231

ANÁLISE GEOFÍSICA-ESTRUTURAL DA ZONA LIMÍTROFE ENTRE AS PROVÍNCIAS GEOTECTÔNICAS SÃO FRANCISCO E MANTIQUEIRA NA PORÇÃO SUDESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Mayko Elias Araújo Neves

Orientador

Prof. MSc. Thiago José Augusto Madeira

Co-orientadora

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título de Engenheiro Geólogo em cumprimento ao disposto nas normas da Universidade Federal de Ouro Preto.

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: Mayko Elias Araújo Neves

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

N518a

Neves, Mayko.

Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas São Francisco e Mantiqueira na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero [manuscrito] / Mayko Neves. - 2017.

84f.: il.: color; graf. (231)

Orientador: Prof. MSc. Thiago José Augusto Madeira.

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.

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

1. Geofísica. 2. Geologia estrutural. 3. Magnetometria. 4. Radiometria. I. Madeira, Thiago José Augusto. II. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 551.243:550.3

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

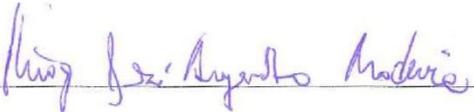
TÍTULO: Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas São Francisco e Mantiqueira na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero.

AUTOR: MAYKO ELIAS ARAÚJO NEVES

ORIENTADOR: Thiago José Augusto Madeira

Aprovada em: 18 de maio de 2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Thiago José Augusto Madeira  _____ DEGEO/UFOP

Prof. Marco Antônio Fonseca  _____ DEGEO/UFOP

Prof. Marcos Tadeu de Freitas Suíta  _____ DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 18/05/20 17

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Sebastião e Maria D'Ajuda pelo apoio e por sempre me incentivarem a perseguir meus sonhos.

À Universidade Federal de Ouro Preto e seus professores pelo ensino de qualidade.

Agradeço ao professor MSc. Thiago José Augusto Madeira pela disposição, atenção e excelente orientação, e à professora Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa pela coorientação.

Agradeço à República Marragolo, minha segunda casa, pela acolhida e aos meus irmãos marragolenses pela força e compreensão durante a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	1
1.3 OBJETIVOS E METAS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	3
1.5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIA DE AÇÃO.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 SÍNTESE DA GEOLOGIA REGIONAL.....	6
2.2.1 Província Geotectônica Mantiqueira.....	7
2.2.2 Província Geotectônica São Francisco.....	8
2.3 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	10
2.3.1 Quadrilátero Ferrífero.....	10
2.4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO ORÓGENO ARAÇUAÍ.....	15
2.4.1 Orógeno Araçuaí.....	15
2.5 GEOLOGIA LOCAL.....	17
CAPÍTULO 3.....	19
MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	19
3.1 INTRODUÇÃO.....	19
3.2 MAGNETOMETRIA.....	19
3.2.1 Campo Magnético Terrestre.....	20
3.2.2 Susceptibilidade Magnética e Magnetização das Rochas.....	21
3.2.3 Anomalias magnéticas.....	23
3.2.4 Filtragem dos Dados.....	23
3.2.5 Deconvolução de Euler.....	24

3.3 RADIOMETRIA.....	25
3.3.1 Radioatividade Natural.....	25
3.3.2 Radioatividade das Rochas e Minerais.....	26
CAPÍTULO 4.....	29
ANÁLISE QUALITATIVA.....	29
4.1 INTRODUÇÃO.....	29
4.2 BANCO DE DADOS.....	29
4.3 METODOLOGIA DE GERAÇÃO DOS MAPAS E IMAGENS.....	31
4.4 INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA.....	34
4.4.1 Análise morfoestrutural.....	34
4.4.2 Magnetometria.....	35
4.4.3 Radiometria.....	40
4.5 GEOLOGIA ECONÔMICA.....	47
CAPÍTULO 5.....	51
ANÁLISE QUANTITATIVA.....	51
5.1 INTRODUÇÃO.....	51
5.2 METODOLOGIA APLICADA.....	51
5.3 VISUALIZAÇÃO EM 3D.....	57
5.5 DISCURSÃO E RESULTADOS.....	58
CAPÍTULO 6.....	61
INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA.....	61
6.1 INTRODUÇÃO.....	61
6.2 DESCRIÇÃO DAS SEÇÕES GEOTRANSVERSAIS.....	61
6.2.1 Seção A-A'	62
6.2.2 Seção B-B'	68
6.3 DISCURSÕES.....	76
CAPÍTULO 7.....	79
CONCLUSÃO.....	79
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Mapa de localização geográfica e de vias de acesso da área de estudo, gerado a partir do <i>software</i> QGIS 2.12.2.....	02
Figura 2.1- Localização do Quadrilátero Ferrífero (QFe) no contexto geotectônico do cráton São Francisco (CSF), a esquerda, e mapa geológico.....	05
Figura 2.2- Mapa Geológico simplificado da porção SE do Cráton São Francisco, Minas Gerais, Brasil.....	06
Figura 2.3- Relação entre nappes Curral e Ouro Preto, e identificação da zona de cisalhamento São Vicente (ZCSV) e da zona de cisalhamento Água Quente (ZCAQ).....	12
Figura 2.4- Seções modelo da nappe curral: A- seção Itatiaiuçu; B- seção Três Irmãos; C- seção Ravena; D- seção Bonfim; V- vergência; ST- Topografia atual	13
Figura 2.5- Figura esquemática do Sinclinal Dom Bosco mostrando parte dos flancos invertidos das nappes Ouro Preto e Ouro Branco.....	14
Figura 2.6- A evolução tectono-estrutural do evento minas para o limite sul do Quadrilátero Ferrífero	15
Figura 2.7- Cenário geotectônico do sistema orogenético Araçuaí-Congo Ocidental e os crátons relacionados	16
Figura 2.8- Mapa geológico regional simplificado da área de estudo.....	18
Figura 3.1 - Componentes do campo magnético terrestre.....	20
Figura 3.2 - Histograma mostrando os valores médios e os intervalos de susceptibilidade dos tipos de rochas mais comuns.....	22
Figura 3.3- O gráfico ternário mostrando a abundância relativa de elementos radioativos em diferentes tipos de rochas	26
Figura 3.4- Variação na média do conteúdo de K, eTh, eU para rochas ígneas intrusivas e extrusivas com aumento no conteúdo de sílica	27
Figura 4.1- Área 2 do levantamento da CODEMIG, dividida em bloco Oeste e bloco Leste, com o mapa temático de amplitude de sinal analítico.....	30
Figura 4.2- À esquerda, imagem SRTM. À direita, imagem de relevo sombreado gerada a partir da imagem SRTM.....	31
Figura 4.3- Fluxograma exibindo a metodologia utilizada para a geração dos <i>grids</i> em mapas magnetométricos. CA – campo magnético anômalo.....	32
Figura 4.4- Fluxograma exibindo a metodologia utilizada para a geração dos <i>grids</i> em mapas radiométricos. U – canal de urânio.....	33
Figura 4.5- Imagem de relevo sombreado gerada a partir de imagem SRTM, com os principais lineamentos traçados.....	34
Figura 4.6- Acima é apresentado o mapa de amplitude de sinal analítico (ASA) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão	36

Figura 4.7- Mapa de temático de amplitude de sinal analítico (ASA) com lineamentos traçados e diagrama de roseta mostrando as direções preferen.....	38
Figura 4.8- Mapa temático da segunda derivada vertical (D^2z) com lineamentos traçados e diagrama de rosetas mostrando a direção.....	39
Figura 4.9- Acima é apresentado o mapa do canal de tório (Th) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão de radiofácies.....	41
Figura 4.10- Acima é apresentado o mapa ternário (Ter) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão de radiofácies e a numeração segundo a Tabela 4.2.....	43
Figura 4.11- Acima, mapa geológico simplificado da área de estudo (Modificado da CPRM 2014), e abaixo, a sobreposição do mapa.....	46
Figura 4.12- Processos abertos no Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) e respectivas substâncias de interesse.....	47
Figura 4.13- Mapa geológico simplificado da área estudada com indicação dos recursos minerais existentes segundo dados do DNPM.....	48
Figura 4.14- Mapa temático parâmetro F com indicação das mineralizações de Manganês, Ouro, Talco, Wolframita (DNPM 2017).....	49
Figura 4.15- Mapa temático do canal de Potássio com indicação das mineralizações de Manganês, Ouro, Talco e Wolframita (DNPM 2017).....	50
Figura 5.1- Distribuição dos perfis gerados no <i>software Oasis Montaj 7.0.1</i> , com destaque para aqueles que foram analisados por meio da deconvolução de Euler.....	51
Figura 5.2- Resultado da deconvolução de Euler no perfil sete (P7) de direção norte-sul. Foi utilizado janela de tamanho 7.....	53
Figura 5.3- Resultado da deconvolução de Euler no perfil treze (P13) de direção norte-sul. Foi utilizado janela de tamanho 7.....	54
Figura 5.4- Resultado da deconvolução de Euler no perfil treze (P8) de direção leste-oeste. Foi utilizado janela de tamanho 7.....	55
Figura 5.5- Resultado da deconvolução de Euler no perfil quatorze (P17) de direção leste-oeste. Foi utilizado janela de tamanho 11.....	56
Figura 5.6- Visualização 3D da área estudada, a partir do método de inversão magnetométrica (Deconvolução de Euler).....	58
Figura 6.1- Mapa geológico simplificado da área de estudo com os pontos onde foram feitas as observações em campo.....	61
Figura 6.2- Seção geológica vertical oeste-leste. Acima são apresentados os domínios <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i> , respectivamente.....	63
Figura 6.3- Foto do gnaiss do Complexo Santa Bárbara, com visada para sudeste. (A): bandamento composicional verticalizado.....	64
Figura 6.4- Estereogramas de acamamento (S_b), foliação (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio <i>A</i>	65
Figura 6.5- Estereogramas de acamamento (S_b), xistosidade (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), e plano axial (Paxial), respectivamente, no domínio <i>C</i>	66
Figura 6.6- Mesodobras com padrão "S", eixo com caimento 210/15.....	66

Figura 6.7- Dobramento em veio de quartzo representando uma estrutura fractal do dobramento predominante da área. Ponto 14, com visada para norte.....	67
Figura 6.8- Estereogramas de foliação milonítica (S_m), xistosidade (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio <i>C</i>	68
Figura 6.9- Seção geológica vertical B-B' de direção norte-sul. Acima são apresentados os domínios <i>C</i> , <i>D</i> e <i>E</i> , respectivamente.....	69
Figura 6.10- Contato entre as rochas do embasamento Complexo Santa Bárbara, à esquerda, e xistos do Grupo Nova Lima, à direita. Visada para sudoeste.....	10
Figura 6.11- Metarenito do Grupo Maquiné. Com detalhe para o acamamento, na cor amarela, e xistosidade em vermelho. Visada para oeste.....	71
Figura 6.12- Clorita-sericita-quartzo xistos do Grupo Nova Lima com lente de formação ferrífera bandada, marcando o acamamento em alto ângulo.....	72
Figura 6.13- Estereogramas do domínio <i>D</i> , mostrando as atitudes do acamamento S_b , foliação S_n e lineação de interseção L_{int} , respectivamente.....	72
Figura 6.14- (A): ocorrência de óxido de manganês, disseminado ou cristalizado com hábito botrioidal. (B): detalhe na porção onde o se encontra cristalizado.....	73
Figura 6.15- Estratificação cruzada acanalada em metarenito do Grupo Itacolomé.....	75
Figura 6.16- Estereogramas do acamamento (S_0), xistosidade (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio <i>E</i>	75
Figura 6.17 - Veio de quartzo com formato sigmoidal, indicando vorticidade horaria, com fechamento para sul.....	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Coluna litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	10
Tabela 3.1- Filtros de Fourier com respectivas finalidades geofísicas.....	24
Tabela 3.2- Relação entre índices estruturais e modelos físico e geológico para dados de magnetometria	25
Tabela 3.3- Principais minerais radioativos e modos de ocorrência.....	38
Tabela 4.1- Radiofácies identificadas a partir da análise do mapa temático do canal de Th e valores do conteúdo radioativo em contagem por segundo (cps).....	42
Tabela 4.2- Radiofácies com respectivos valores relativos de acordo a imagem ternária.....	44

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) constitui uma das mais importantes províncias minerais brasileiras e do mundo, fazendo com que a região seja intensamente estudada, ainda assim existem controvérsias quanto a sua evolução tectônica. O presente trabalho visa contribuir com o conhecimento geológico da porção sudeste do QFe, zona limítrofe entre a Província Geotectônica São Francisco e Província Geotectônica Mantiqueira, fazendo uso do banco de dados geofísicos aerolevados da CODEMIG, através de análises qualitativa e quantitativa dos métodos magnetométricos e radiométricos integradas a dados geológicos colhidos em campo e bibliográficos. Para tanto, foi aplicado a deconvolução de Euler sobre os dados geofísicos magnetométricos para representação da topografia média em profundidade das fontes de anomalias magnéticas, além de geração de mapas temáticos magnetométricos e radiométricos. Os resultados obtidos pelas análises geofísicas, bem como a correlação com mapas geológicos existentes e seções geológicas levantadas a partir de campanhas de campo, possibilitaram a análise estrutural do arcabouço tectônico da área, além de conferir a eficácia dos métodos utilizados.

Palavras chave: *geofísica, geologia estrutural, magnetometria, radiometria, quadrilátero ferrífero, província geotectônica mantiqueira, província geotectônica são francisco*

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) vem sendo estudado desde o século XIX, a partir dos trabalhos pioneiros realizados pelo Barão de Eschwege (1833). Desde então, foram muitas as contribuições às geociências nesta região e em sua maior parte associadas ao grande potencial econômico. Ainda assim, atualmente se faz necessário a realização de trabalhos científicos para o melhor entendimento da complexa geologia local, principalmente nas adjacências do QFe onde os estudos em escala de detalhe são poucos ou mal difundidos. Este trabalho vem fazer uso de dados de domínio público para contribuir com o conhecimento geológico da região, usando da geofísica como ferramenta para geração de informações de subsuperfície.

Desta forma, este trabalho teve como finalidade a integração de dados geofísicos (mapas e perfis de inversão) com dados lito-estruturais de campo e bibliográficos da região situada no limite sudeste do Quadrilátero Ferrífero, zona de transição do segmento cratônico para o domínio do erógeno Araçuai.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudos está inserida na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais, apresenta geometria quadrilátera com cerca de 25 km de extensão lateral perfazendo uma área total de 625 km². A porção de interesse situa-se no limite sudeste do cráton São Francisco, sendo que cerca de 55% está inserida em terrenos da faixa Araçuai. Quase sua totalidade está no município de Mariana, sendo que aproximadamente 20% encontra-se no Município de Diogo de Vasconcelos e 5% no Município de Acaiaca.

A partir da capital do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, o percurso rumo a área inicia-se pela BR-040 até o ponto de encontro com a rodovia BR-356, seguindo-se por esta até Ouro Preto e em seguida em direção à cidade de Mariana, até o cruzamento com rodovia MG-262. A partir deste ponto, segue-se por aproximadamente 10 km pela MG-262 na direção leste, chegando-se ao limite da área (Figura 1.1). A quilometragem total do percurso é de aproximadamente 120 km.

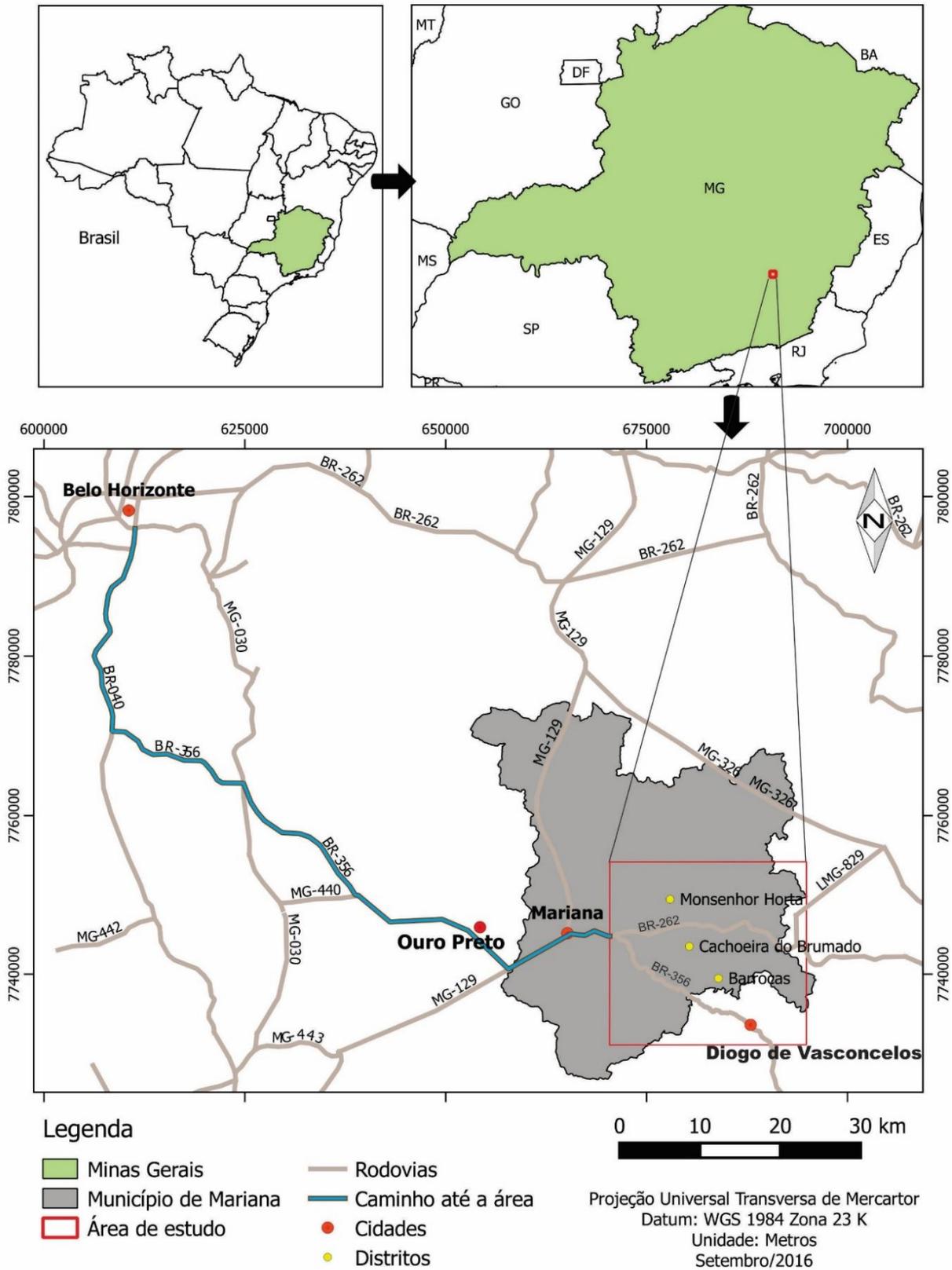


Figura 1.1- Mapa de localização geográfica e de vias de acesso da área de estudo, gerado a partir do software QGIS 2.12.2.

1.3 OBJETIVOS E METAS

O objetivo deste trabalho consistiu na análise qualitativa e quantitativa de dados geofísicos aerolevantados, possibilitando a análise estrutural do arcabouço tectônico da área.

O presente trabalho propôs os seguintes produtos:

- geração de mapas magnetométricos, radiométricos e a caracterização das respostas geofísicas;
- aplicação da deconvolução de Euler para obtenção de perfis magnetométricos 2D para visualização de estruturas em profundidade;
- integração dos dados geofísicos com dados geológicos de campo e descritos na literatura;
- geração de um modelo magnetométrico 3D de profundidade média de topo das fontes magnéticas.

1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Fazendo uso de mapeamentos geológicos em pequena escala, 1:1.000.000 (CPRM 2014), do banco de dados geofísicos obtidos por órgãos governamentais, de trabalhos realizados pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, bem como de dados colhidos em trabalhos realizados em campo, foi possível fazer a integração geológica-geofísica da área e contribuir para o melhor entendimento da geologia local.

Este trabalho apresenta relevância na contribuição ao conhecimento geológico da região, usando os resultados obtidos através de métodos aerogeofísicos (magnetometria e radiometria) para comparação com as informações bibliográficas disponíveis.

1.5 METODOLOGIA E ESTRATÉGIA DE AÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo as seguintes etapas:

Pesquisa bibliográfica: compilação de trabalhos do QFe e da porção sudoeste da faixa Araçuaí. Nesta etapa foi dada ênfase a geologia regional, obtendo dados litoestratigráficos e estruturais.

Processamento do banco de dados: foi utilizado o banco de dados aerogeofísicos (magnetométricos e radiométricos), resultante do Programa de levantamento aerogeofísico de Minas Gerais disponibilizados pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais - CODEMIG (CODEMIG 2001). A região de estudo corresponde à Área 2 Leste desse levantamento. Também foi utilizado o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, que é parte do programa Geologia do Brasil, executado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM (CPRM 2014).

Confecção de mapas temáticos: foram gerados diversos mapas temáticos para cada método geofísico (magnetometria e radiometria) a fim de melhor caracterizar a área de estudo. Os mapas foram gerados através do *software Geosoft Oasis Montaj*, o tamanho de célula que gerou os melhores mapas foi de 350.

Integração em ambiente SIG: Os mapas gerados por meio do *Geosoft Oasis Montaj* foram importados para o QGIS, integrados e interpretados. Foram gerados perfis de direção N-S e E-W equiespaçados em 1 km, e exportados para o *Geosoft*. No *Geosoft* foram geradas linhas de *grids* sobre os dados de amplitude de sinal analítico.

Análise quantitativa: Para essa etapa, foi utilizado o *software Euler* (versão 1.00) com intuito de realizar a deconvolução de Euler (2D), permitindo a visualização em profundidade do topo médio das fontes que geraram as anomalias magnéticas. Em seguida, no *software ArcGis 9.3*, foi feita a interpolação dos perfis de inversão através da *krigagem* (3D), que possibilitou a visualização da compartimentação tectônica da área. Nesta etapa, foi feita a *krigagem* dos perfis N-S e E-W separadamente e também das duas direções juntas, observando-se qual metodologia iria gerar melhores resultados.

Etapa de campo: Foram realizadas 4 campanhas de campo para reconhecimento das principais estruturas geológicas e reconhecimento dos litotipos. Tais informações foram integradas aos dados geofísicos obtidos nas etapas anteriores.

Redação da monografia: Integração de todos os resultados obtidos nos itens anteriores e finalização do trabalho escrito, apresentando as discussões e conclusões.

2.1 INTRODUÇÃO

A área estudada situa-se geologicamente no extremo sudoeste da Faixa Araçuaí, imediatamente a sudeste do Quadrilátero Ferrífero (QFe), no limite do cráton do São Francisco (Figura 2.1). Compreende a zona limite entre duas importantes províncias geotectônicas do escudo brasileiro: a Província Geotectônica Mantiqueira (PGM), a leste, e a Província Geotectônica São Francisco (PGSF), a oeste. A PGM representa uma porção da crosta constituída por uma série de cinturões ou faixas móveis que se desenvolveram durante o ciclo Brasileiro. A PGSF corresponde a terrenos do cráton do São Francisco e parte das rochas do embasamento afetadas pelas deformações do ciclo Brasileiro (Baltazar & Raposo 1993).

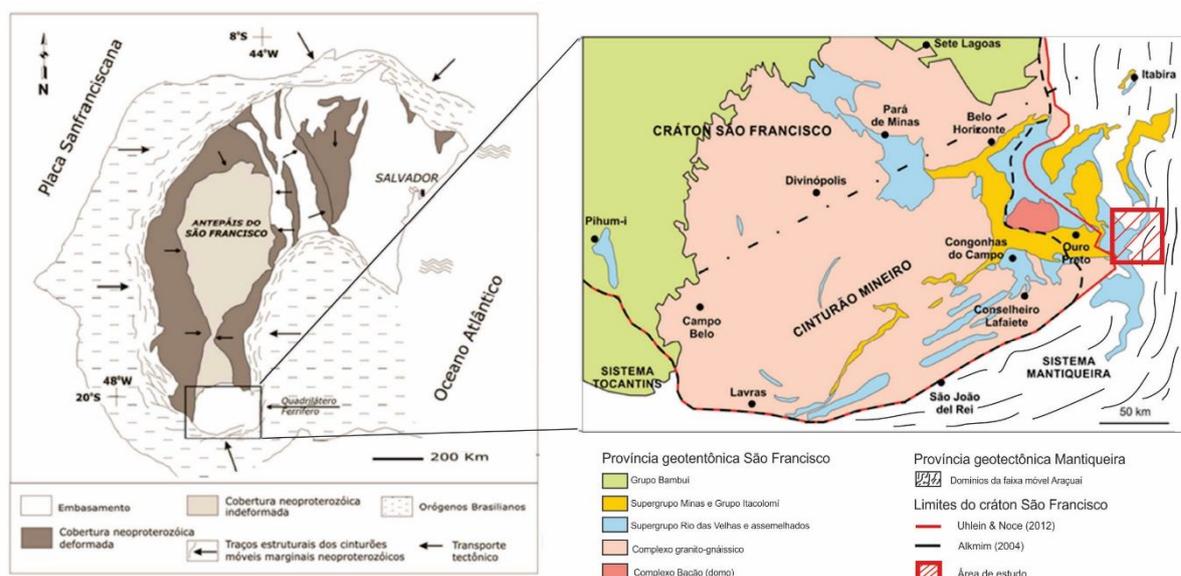


Figura 2.1- Localização do Quadrilátero Ferrífero (QFe) no contexto geotectônico do cráton São Francisco (CSF), a esquerda, e mapa geológico destacando o QFe e a área de estudos nos limites do Cinturão Mineiro, a direita. Há uma divergência entre Alkmim (2004) e Uhlein & Noce (2012) quanto a posição dos limites do CSF no domínio QFe (modificado de Alkmim (2004) e Uhlein & Noce (2012) in Madeira (2016)).

A região possui poucos estudos geológicos de detalhe, principalmente no que diz respeito a PGM, sendo que o principal trabalho foi desenvolvido pelo Serviço Geológico do

Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..

Brasil (CPRM) no início da década de 1990, através do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil na Folha Mariana (SF23-X-B-I) em escala 1:100.000, (Baltazar e Raposo 1993), onde é descrita a porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bem como as rochas do Complexo Mantiqueira que bordejam o QFe.

As atividades realizadas na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC400), oferecida pelo Departamento de Geologia, da Escola de Minas, da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/EM/UFOP) no ano de 2007, também contemplam a localidade. No entanto não foi possível ter acesso aos mapas confeccionados, já que os mesmos não se encontram anexados aos trabalhos disponíveis na biblioteca do DEGEO/EM/UFOP.

2.2 SÍNTESE DA GEOLOGIA REGIONAL

Com o intuito de individualizar as particularidades das unidades litológicas aflorantes na região estudada, estas serão descritas em dois grupos relativos a PGM e a PGSF.

A Figura 2.2 mostra a localização da área de estudo em um contexto regional com o Quadrilátero Ferrífero, a oeste, e os terrenos arqueanos da faixa Araçuaí, a leste.

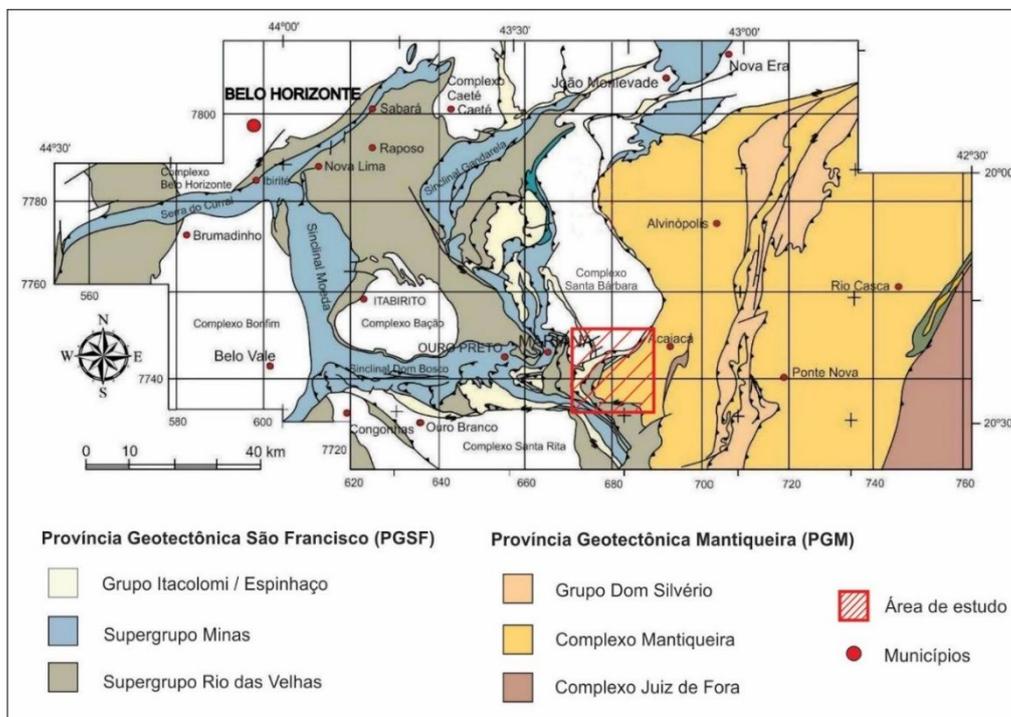


Figura 2.2- Mapa Geológico simplificado da porção SE do Cráton São Francisco, Minas Gerais, Brasil (modificado de Grohmann 2004).

2.2.1 Província Geotectônica Mantiqueira

Suíte alcalina da Mantiqueira

A suíte alcalina da Mantiqueira constitui um corpo alongado de direção norte-sul que aflora apenas no limite sudeste da área de estudo. Não foi encontrada na literatura descrição desta unidade, porém consta no mapa da CPRM (2014) como um litotipo constituído por ortognaisses sienítico alcalino de idade paleoproterozoica.

Complexo Acaiaca

O complexo metamórfico Acaiaca localiza-se a leste da área de estudo e constitui uma faixa com cerca de 6 km de largura que se estende por cerca de 36 km na direção norte-sul. E é constituído predominantemente por rochas de fácies granulito (Medeiros Júnior 2009).

Jordt-Evangelista (1985) identificou e assim denominou o complexo Acaiaca. Segundo a autora o litotipo é constituído predominantemente por granulitos félsicos, máficos, ultramáficos, granulitos de protólito pelítico e granitos pegmatíticos. As rochas apresentam-se bandadas, com mergulho praticamente vertical, e cortadas por pegmatitos graníticos que podem ser concordantes com o bandamento.

Complexo Mantiqueira

Segundo Baltazar & Raposo (1993), o complexo Mantiqueira é composto por biotita-hornblenda gnaisses bandados, com alternância de níveis quartzo-feldspáticos e máficos ricos em biotita e anfibólios. As paragêneses minerais dos gnaisses indicam metamorfismo de fácies anfibolito com retrometamorfismo incipiente de fácies xisto verde. Em muitos locais mostram estruturas migmatíticas. Todos estes litotipos ocorrem com intercalações de anfibolitos, metagabros e granitóides. Esta unidade também apresenta intercalação através de contatos tectônicos com rochas do complexo Acaiaca, do Grupo Dom Silvério e do Grupo Nova Lima.

Granitóide Diogo de Vasconcelos:

O granitóide Diogo de Vasconcelos é um corpo alongado segundo a direção nordeste-sudeste. Segundo Baltazar & Raposo (1993), o granitóide Diogo de Vasconcelos é composto por biotita ortognaisses muito homogêneos, bem foliados a laminados por cisalhamento.

2.2.2 Província Geotectônica São Francisco

Complexo Santa Bárbara

Segundo Baltazar & Raposo (1993), o complexo Santa Barbara é composto por migmatitos que se encontram envoltos pelas supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas. Distinguem-se três litotipos, sendo o primeiro um gnaisse tonalíticos a trondhjemíticos muito claro e frequentemente bandado e injetado por rochas graníticas; o segundo tipo é uma rocha de composição granítica, frequentemente foliada, com granulação média a grossa, quase sempre foliada e que foi observada injetando o primeiro litotipo; e por último, uma rocha de coloração escura que aparece como xenólitos quase sempre deformados, às vezes de aspecto xistoso de composição variada e ora pode ser classificada como anfibolito, ora como metadiorito.

Unidades correlacionadas ao Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas é atualmente dividido em três grupos (Baltazar *et al.* 2005, Baltazar & Zucchetti 2007), da base para o topo: Grupo Quebra Ossos, Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné.

O Grupo Quebra Osso corresponde a uma associação de litofácies plutônica-vulcânica máfica-ultramáfica, que se constitui de metakomatiito peridotítico, metakomatiito, serpentinito, formação ferrífera, metachert, turmalinito, filito carbonoso (Baltazar *et al.* 2005).

O Grupo Nova lima é uma unidade constituída por xisto verde metassedimentar e metavulcânico e filito com intercalações de quartzito, grauvaca, dolomito, talco xisto e formação ferrífera (Baltazar *et al.* 2005).

O Grupo Maquiné é subdividido nas formações Palmital e formação Casa Forte, no topo. A primeira é composta de quartzitos \pm sericíticos, quartzo-sericita xisto e xisto carbonoso subordinado, representando metarenito, metagrauvaca e metargilito, com estratificação cruzada preservada de pequeno a médio porte. Representam metaturbiditos proximais da associação de litofácies ressedimentada. A segunda corresponde à associação de litofácies não-marinha, composta por rochas metassedimentares interpretadas como depósitos aluvial-fluviais de um sistema de rios entrelaçados, constituída basicamente por lentes de conglomerado e quartzitos (Baltazar & Raposo 1993, Baltazar *et al.* 2005).

Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi

O Supergrupo Minas, sobreposto de forma discordante ao Supergrupo Rio das velhas, é uma unidade metassedimentar de origem plataformar, dividida em quatro unidades da base para o topo: Grupo Caraça, Grupo Itabira, Grupo Piracicaba e Grupo Sabará (Dorr 1969, Renger *et al.* 1994, Alkmim & Marshak 1998).

O Grupo Sabará é composto por uma sequência metavulcanossedimentar, constituída de mica xisto e clorita xistos com intercalações de metagrauvaca, quartzito, quartzito feldspático a ferruginoso, formação ferrífera e metaconglomerado. Seu limite superior é uma superfície de erosão e o inferior sobrepõe-se diretamente ao Grupo Piracicaba (Baltazar *et al.* 2005).

O Grupo Itacolomi indiviso, ocorre em discordância angular com o Grupo Sabará. Predominam quartzitos associados e lentes de conglomerado polimítico e de filito (Baltazar *et al.* 2005).

Suíte Alto Maranhão:

A suíte Alto Maranhão foi definida por Raposo (1991) como granitóides de granulação média a grossa e composta quase sempre de albita ou albita/oligoclásio e quartzo, com predomínio de plagioclásio. Em geral, exibe textura granonematoblástica e estruturas que evidenciam esforços tectônicos. Ocorre individualizado na Serra do Carmo, nas proximidades da localidade de Bandeira e a sudeste do Distrito de Santo Antônio do Pirapetinga, onde é possível encontrar suas melhores exposições.

A Tabela 2.1 mostra a coluna estratigráfica do QFe com as unidades do embasamento e supracrustais pertencentes a PGSF.

Tabela 2.1- Coluna litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Modificada de Dorr (1969), Ladeira (1980), Renger *et al.* (1994), Almeida *et al.* (2005), Baltazar *et al.* (2005), Lobato (2005) e Pastori (2010).

Idade	Supergrupo	Grupo	Formação	Descrição		
PROTEROZOÍCO	Minas	Itacolomi	Indiviso	Ortoquartzitos, quartzitos (matriz ferruginosa), filitos quartzosos, filitos e conglomerado com seixos de itabirito. Discordância angular		
		Sabarará	Estrada Real	Metarenitos sericíticos, metaconglomerados polimíticos e metadiamicíticos.		
			Saramenha	Clorita-xistos, xistos, filitos negros metagrauvas, metatufos, turbiditos e itabiritos. Discordância erosiva		
		Piracicaba	Barreiro	Filitos e filitos grafitosos.		
			Tabões	Ortoquartzitos.		
			Fecho do Funil	Filitos, filito dolomítico e dolomito silicoso.		
			Cercadinho	Quartzito ferruginoso, quartzitos, filitos ferruginosos e dolomitos. Discordância erosiva		
		Itabira	Gandarela	Dolomitos, filito dolomítico e calcário.		
			Cauê	Formações ferríferas, itabirito dolomítico, lentes de filitos e xistos.		
		Caraça	Batatal	Filito e filitos sericítico e grafitosos, metachert e formação ferrífera.		
			Moeda	Metaconglomerados, quartzitos e filitos. Discordância erosiva e angular		
		ARQUEANO	Rio das Velhas	Maquiné	Casa Forte	Quartzito sericítico, clorítico a xistoso, metaconglomerados e filitos.
					Palmital	Quartzito sericítico, quartzo-sericita xistos, metarenitos, metagrauvas, metargilito.
				Nova Lima	Indiviso	Xistos verdes metassedimentar e vulcânico, filitos com intercalações de quartzitos, grauvas, dolomitos, talco xistos e formações ferríferas.
				Quebra Ossos	Indiviso	Metakomatiitos peridotítico, metakomatiito, serpentinito, filitos cabonosos, formações ferríferas, metacherts, turmalinito. Discordância erosiva e angular
Embasamento	Bação Caeté Bonfim Santa Bárbara Belo Horizonte		Gnaisses bandados, gneisses migmatíticos, augen-gnaisses e granitos.			

2.3 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

2.3.1 Quadrilátero Ferrífero

Diversos autores têm dedicado esforços afim de compreender a complexa evolução tectono-estrutural da região QFe, dentre outros destacam-se os trabalhos de Endo (1997),

Alkmin & Marshchak (1998), Almeida (2004), Endo *et al.* (2005) e Madeira (2016) que foram usados como base para este trabalho.

Endo (1997) caracteriza o primeiro evento de deformação conhecido no QFe como evento Bonfim, de caráter tectono-termal com um regime de deformação dúctil transcorrente, que ocorreu durante o Mesoarqueano, quando bacias vulcanossedimentares como o *greenstone belt* Rio das Velhas se formaram. Subsequente, são considerados três ciclos tectono-deformacionais principais para a estruturação do QFe. O primeiro deles se refere ao ciclo Jequié (2780-2560), o segundo é relativo à orogênese Transamazônica (2250-1900 Ma) e o terceiro ciclo corresponde à orogênese Brasileira (650-500 Ma).

O evento Jequié (2780-2560) é subdividido em três fases deformacionais (Endo 1997). A primeira, denominada Rio das Velhas I, é caracterizada por um regime transpressional dextral, com deformação cisalhante do *greenstone belt* Rio das Velhas e metamorfismo do Grupo Nova Lima. A segunda fase compreende um regime transpressional sinistral, caracterizado por evento de cisalhamento e fraturamento crustal e ainda a intrusão de diques máficos. A terceira fase possui regime transpressional dextral, com a orogênese Maquiné de caráter dúctil e intrusão de plútons granínicos.

O Transamazônico (2250-1900 Ma) é o terceiro evento tectônico deformacional definido por Endo (1997) e ocorre sobre regime transpressivo, sendo composto por duas fases. A primeira fase é denominada orogênese Minas (2250-2059 Ma), subdividida em dois estágios: extensional e compressional. No primeiro ocorre a inversão da bacia Minas e intensa atividade magmática com a colocação de plútons. O segundo estágio possui caráter extensional, com a formação de megassinclinais e estruturas dômicas, além da deposição do Grupo Itacolomi. A segunda fase é denominada orogênese Itacolomi (2059-1900 Ma), também subdividido em dois estágios, cujo primeiro possui caráter transpressivo sinistral, com reativação de descontinuidades e falhas de empurrão. O segundo estágio tem caráter extensional pós-orogênico associado a falhamentos normais e intrusões de enxames de veios de quartzo.

O evento Brasileiro (660-500 Ma) apresenta domínio deformacional mais intenso a leste-sudeste do QFe, tornando-se menos intenso em direção ao oeste (Endo (1997), Alkmin & Marshchak (1998), Almeida (2004), Endo *et al.* (2005) e Madeira (2016)). É subdividido por Endo (1997) em duas fases, onde a primeira tem regime compressivo dextral com

dobramentos e redobramentos em escala regional e vergência para NW. A segunda fase é caracterizada por um regime transpressivo sinistral.

Alkmim & Marshak (1998) propõem um modelo de evolução para o Quadrilátero Ferrífero, no Transamazônico representado por eventos de natureza compressional e extensional. O primeiro evento, de natureza compressional, fruto do fechamento de uma bacia de margem passiva, foi associado ao desenvolvimento de estruturas com direção NE, zonas de cisalhamento e dobras regionais. O segundo evento, de caráter extensional, representou o colapso das rochas supracrustais, resultando em uma estruturação do tipo domos e calhas.

Segundo estes autores, em seguida ocorreu a formação da bacia rifte Espinhaço juntamente com a intrusão de diques de diabásio, ainda em regime extensional. No evento Brasileiro (700-450 Ma) formaram-se cinturões de cavalgamento que reativaram e obliteraram estruturas mais antigas, originando faixas móveis.

Almeida (2004), Endo *et al.* (2005) e Madeira (2016) propuseram um modelo de arcabouço estrutural para o QFe constituído por duas nappes superpostas: a nappe Curral e a nappe Ouro Preto (Figura 2.3). Nappes podem ser classificadas tanto do ponto de vista geométrico quanto composicional (Almeida 2004).

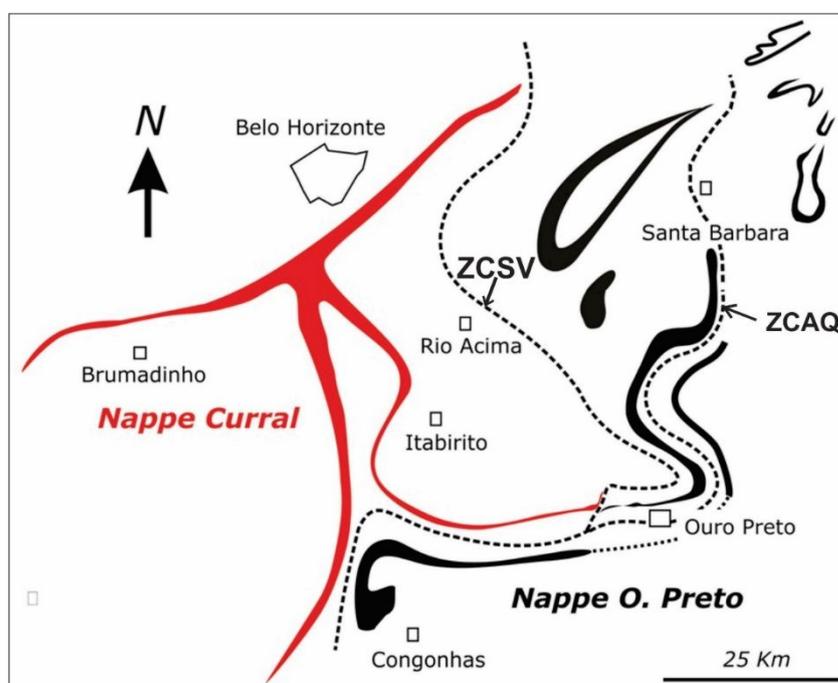


Figura 2.3- Relação entre nappes Curral e Ouro Preto, e identificação da zona de cisalhamento São Vicente (ZCSV) e da zona de cisalhamento Água Quente (ZCAQ) (modificado de Endo *et al.* 2005 in Madeira 2016).

Endo *et al.* (2005) caracterizou a nappe Curral como uma megadobra recumbente alóctone vergente para norte-nordeste que domina o cenário estrutural oeste do Quadrilátero Ferrífero, onde as unidades do Supergrupo Rio das Velhas ocupam o núcleo da megaestrutura (Figura 2.4). O flanco inverso da nappe corresponde a toda sequência Minas/Rio das Velhas que se dispõe na serra do Curral e o flanco normal, que se encontra redobrado, se estende para sul formando o Sinclinal Moeda. A zona de charneira da nappe Curral compreende a região da junção serra do Curral-sinclinal Moeda, complexamente estrangulado pelo envolvimento do Gnaiss Souza Noschese no núcleo na nappe. A xitossidade S_1 encontra-se associada a dobras de variadas escalas as quais se articulam com a estrutura principal que é a nappe Curral. Dobramentos de ordens inferiores ocorrem em toda a área com geometrias e escalas variadas que vão de abertas a fechadas e de centimétricas a quilométricas.

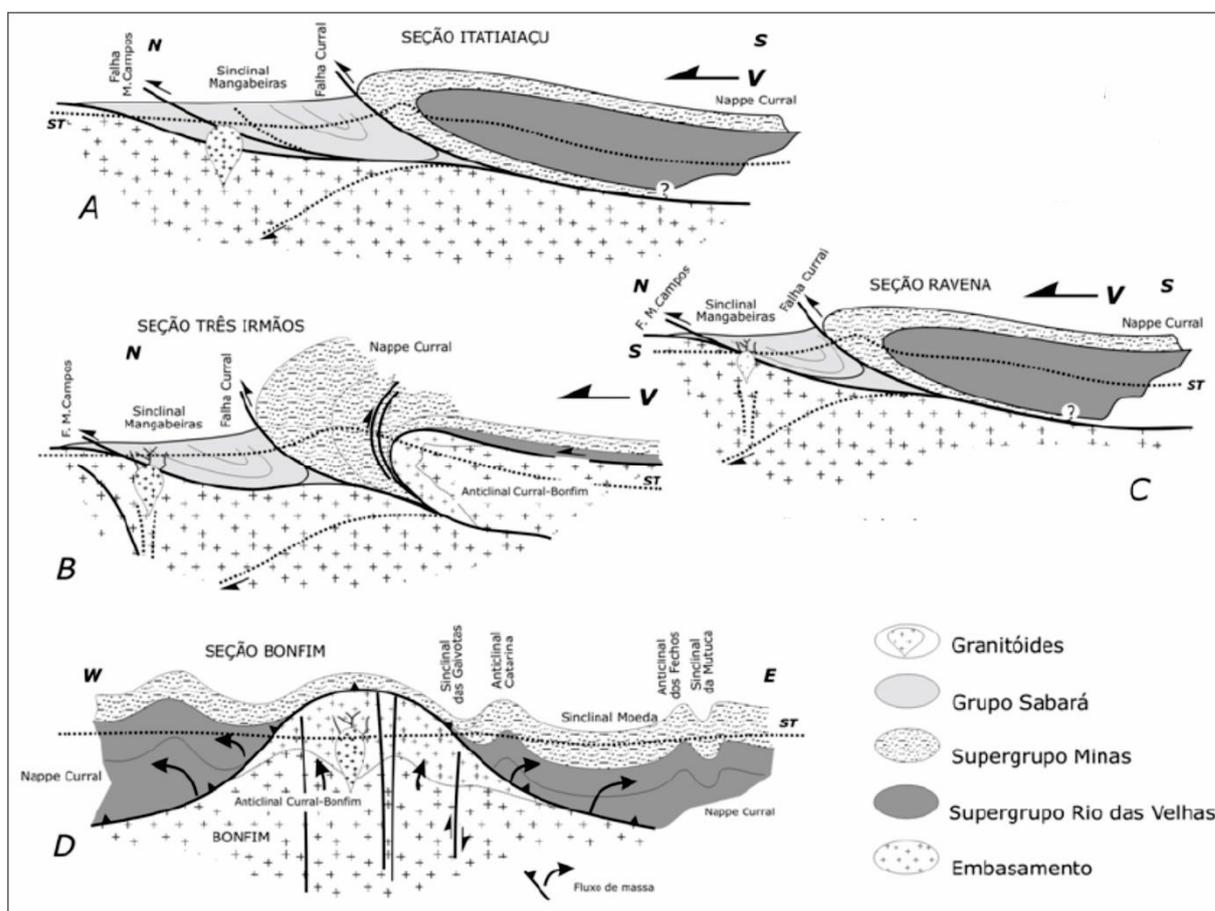


Figura 2.4- Seções modelo da nappe curral: A- seção Itatiaiuçu; B- seção Três Irmãos; C- seção Ravena; D- seção Bonfim; V- vergência; ST- Topografia atual (Endo *et al.* 2005).

Segundo Almeida (2004) a nappe Curral é mais antiga e é superposta pela nappe Ouro Preto, que é representada pelo seu flanco inverso que tem em sua sucessão estratigráfica

os Grupos Itabira, Piracicaba e Sabará, em posição invertida. Associado a esta megaestrutura está a sequência de metarenitos da serra de Ouro Branco e rochas do Supergrupo Rio das Velhas, que configuram a nappe Ouro Branco por meio de um redobramento de uma megadobra isoclinal. Esta nappe, sotoposta à nappe Ouro Preto, possui geometria em forma de *podas*, que em conjunto irá constituir um arranjo imbricado de nappes com vergência para sul (Almeida *et al.* 2002) (Figura 2.5). A esta geração de dobras associa-se uma xistosidade S_1 penetrativa e plano-paralela ao acamamento. Feições subsidiárias desta fase estão presentes nos demais domínios do QFe em todas as escalas, em geral representadas por dobras isoclinais sem raiz.

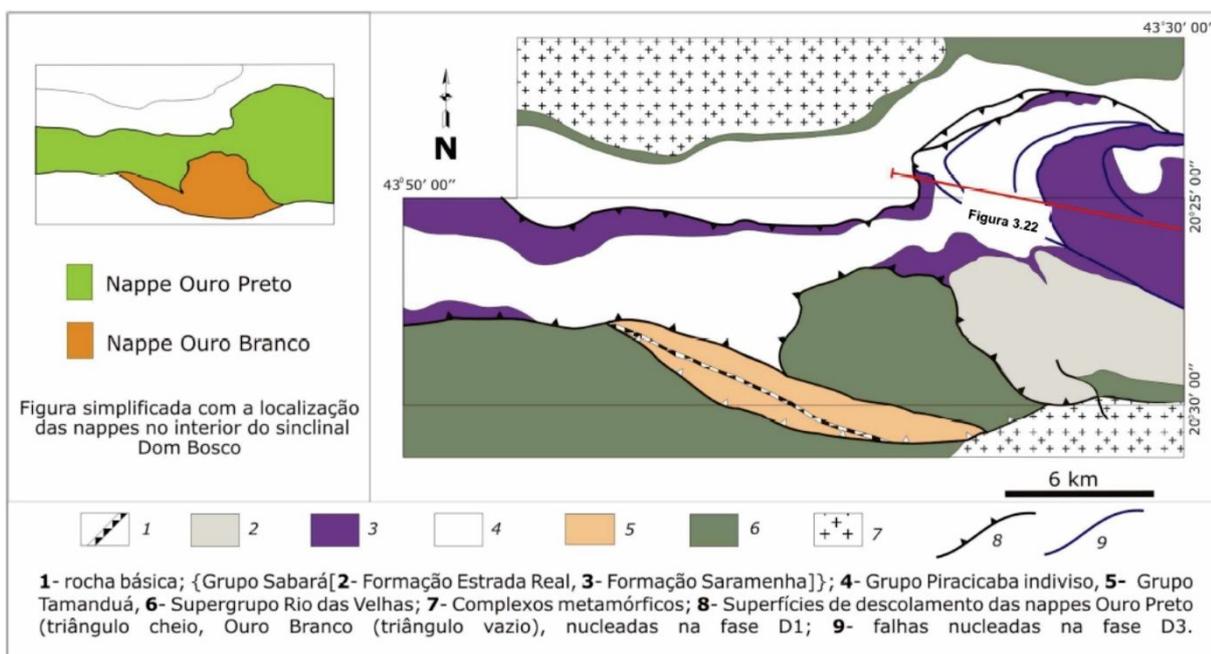


Figura 2.5- Figura esquemática do Sinclinal Dom Bosco mostrando parte dos flancos invertidos das nappes Ouro Preto e Ouro Branco e as superfícies de descolamento basal (Almeida 2004 *in* Madeira 2016).

Almeida *et al.* (2002, 2003, 2005) e Almeida (2004), a partir de estudos estratigráficos e de geologia estrutural apontaram a existência de um importante evento tectono-metamórfico para o sul do QFe, denominado evento Minas, que é registrado por duas fases de dobramentos sucessivas e coaxiais (Figura 2.6). A primeira fase registra a geração de dobras recumbentes de escala regional, que promoveram o deslocamento das unidades do Supergrupo Minas da área fonte. Esta fase é materializada pelas nappes de carregamento Ouro Preto e Ouro Branco. A superfície de deslocamento da nappe Ouro Preto se coalesse com a superfície da nappe Ouro Branco.

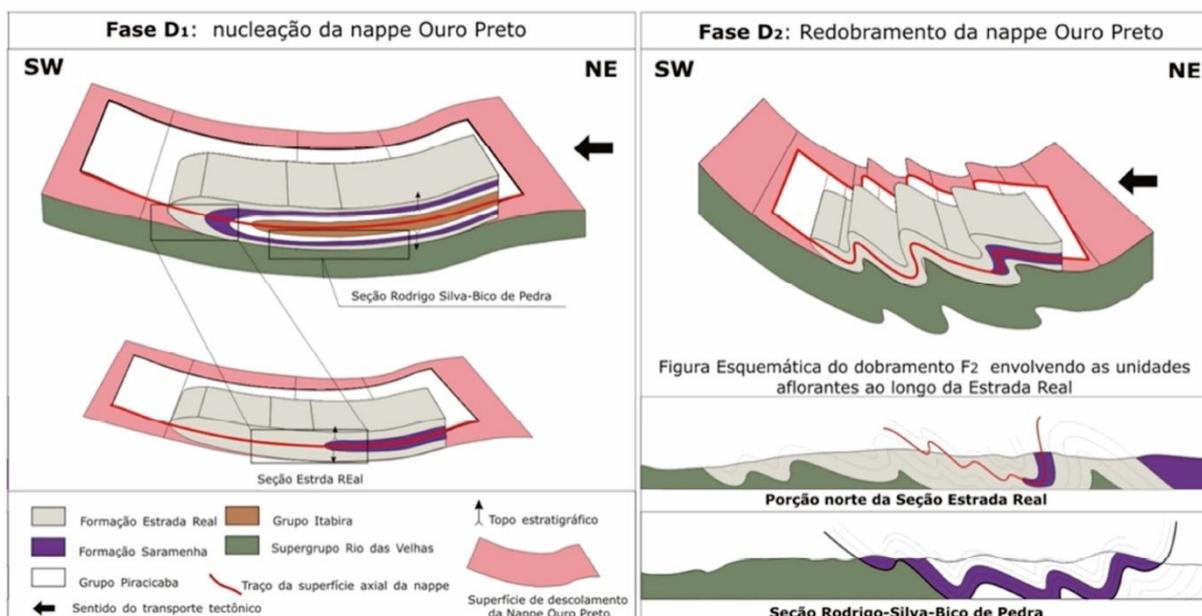


Figura 2.6- A evolução tectono-estrutural do evento minas para o limite sul do Quadrilátero Ferrífero (extraído de Almeida 2004 *in* Madeira 2016).

2.4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DO ORÓGENO ARAÇUAÍ

2.4.1 Orógeno Araçuaí

O paleocontinente São Francisco-Congo (Figura 2.7), representado pelos crátons homônimos localizados em parte na América do Sul e em parte na África, originou-se no limite riaciano-orosiriano (Hasui *et al.* 1993, Alkmin *et al.* 2006, Alkmin *et al.* 2007, Noce *et al.* 2007). A ligação entre as partes dos crátons São Francisco e Congo é uma região preservada do evento orogênico Brasileiro-Pan-Africano denominado ponte cratônica Bahia-Gabão (Pedrosa-Soares *et al.* 2008). Na borda sul desta ponte cratônica desenvolveu-se o orógeno Araçuaí-Congo Ocidental, (Pedrosa-Soares *et al.* 2008, Alkmin *et al.* 2006, Alkmin *et al.* 2007).

Segundo Alkmin *et al.* (2007), o orógeno Araçuaí-Congo Ocidental apresenta-se em mapa com um contorno linguóide ou ferradura, dotado de vergências centrífugas dirigidas para as zonas cratônicas.

O orógeno Araçuaí, situado a leste do cráton São Francisco, representa a parte brasileira do orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. Seu embasamento evoluiu a partir de blocos crustais arqueanos durante um evento de idade paleoproterozóica, que se estendeu, aproximadamente, entre 2,2 e 2,0 Ga. Diversos complexos formam o embasamento do

Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..

orógeno Araçuai, estes são os complexos Guanhões, Gouveia, Porteirinha, Mantiqueira e Juiz de Fora (Noce *et al.* 2007).

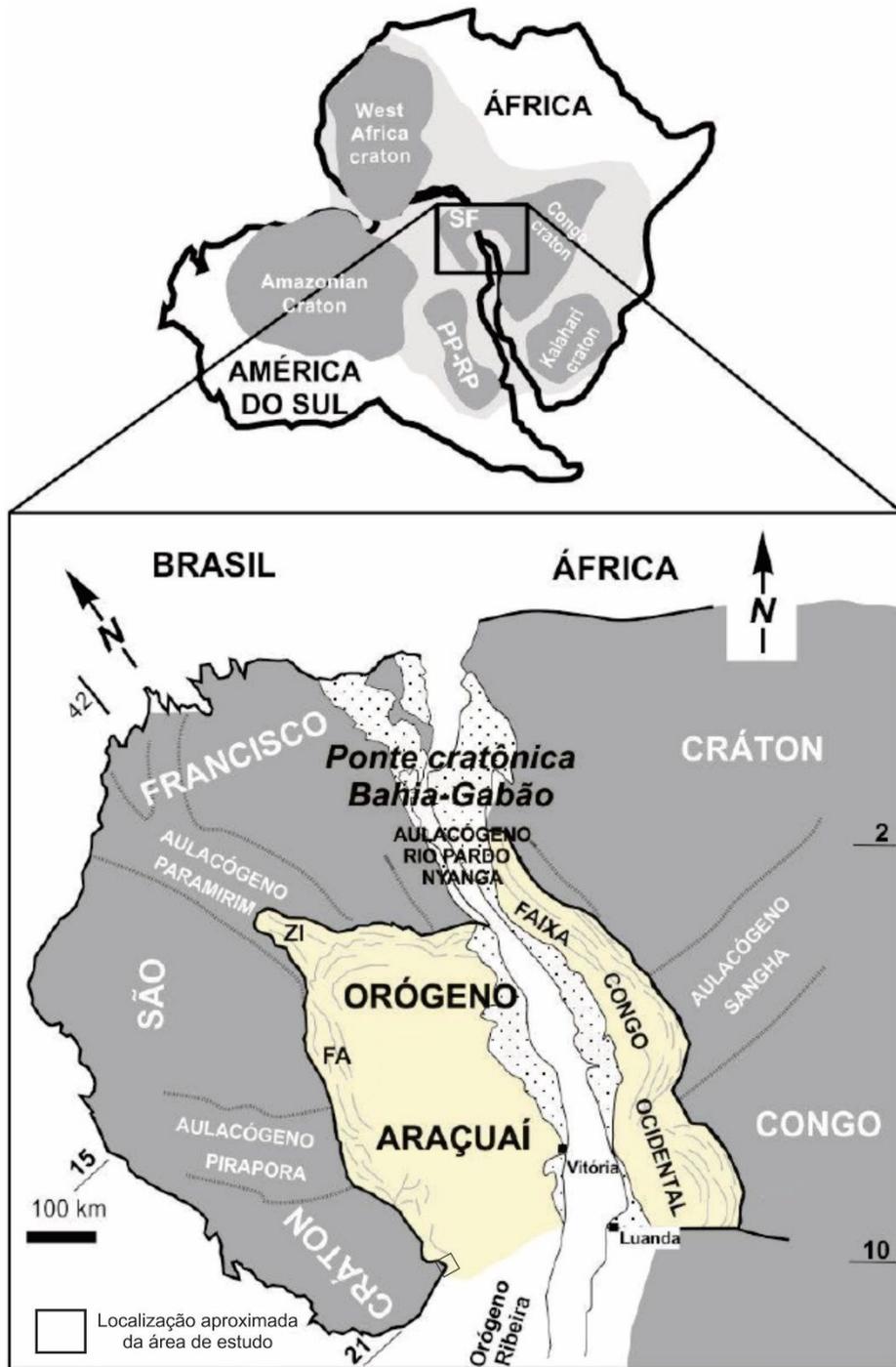


Figura 2.7- Cenário geotectônico do sistema orogenético Araçuai-Congo Ocidental e os crátãos relacionados (modificado de Alkmin *et al.* 2006 in Castro 2014).

Os complexos Guanhões (Arqueano) e Mantiqueira (Paleoproterozóico) podem ser vistos como unidades de caráter autóctone a para-autóctone que representam o embasamento

retrabalhado no domínio do orógeno Araçuaí. O complexo Mantiqueira é entendido como um segmento retrabalhado, no domínio orogênico, do Cinturão Mineiro (Teixeira 1985, Noce *et al.* 2007).

As unidades do embasamento são divididas em domínio externo (oeste) e interno (leste) do orógeno. O domínio externo compreende o cinturão de dobramentos-cavalgamento que bordeja o CSF, com transporte tectônico para oeste e metamorfismo de fácies xisto verde a anfíbolito, crescente de oeste para leste e de norte para sul. No domínio interno, denominado núcleo metamórfico do orógeno, estão expostos volumosos corpos granitóides relacionados às diversas etapas evolutivas do orógeno, com metamorfismo de alto grau nas rochas associadas.

2.5 GEOLOGIA LOCAL

A seguir é apresentado o mapa geológico simplificado da área de estudo (Figura 2.8), onde afloram as unidades já descritas no item 2.1.1. O mapa foi construído a partir da base de dados disponibilizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM 2014).

As unidades foram divididas em Província Geotectônica São Francisco (PGSF): complexo Santa Bárbara, Grupo Quebra Osso, Grupo Nova Lima, Grupo Maquiné, Grupo Sabará, Grupo Itacolomi e suíte Alto Maranhão; e Província Geotectônica Mantiqueira (PGM): complexo Acaiaca, complexo Mantiqueira, granitóide Diogo de Vasconcelos e suíte alcalina da Mantiqueira.

Na PGSF, as rochas do complexo Santa Bárbara afloram na parte norte e nordeste. As unidades relacionadas ao Supergrupo Rio das Velhas ocorrem na porção sudoeste e em uma faixa que vai do oeste até nordeste, além de uma segunda faixa que ocorre na parte noroeste da área. O Grupo Sabará, Grupo Itacolomi e suíte Alto Maranhão ocorrem em corpos alongados de direção noroeste-sudeste no extremo sudoeste da região estudada.

Na PGM, as rochas do complexo Mantiqueira ocupam a maior parte da área, localizando-se na parte oriental do mapa. O granitoide Diogo de Vasconcelos constitui um corpo alongado segundo direção sudoeste-nordeste e localiza-se no centro-sudeste da área. O complexo Acaiaca, que é um corpo alongado de direção norte-sul, aflora apenas em uma pequena parte na porção leste no mapa.

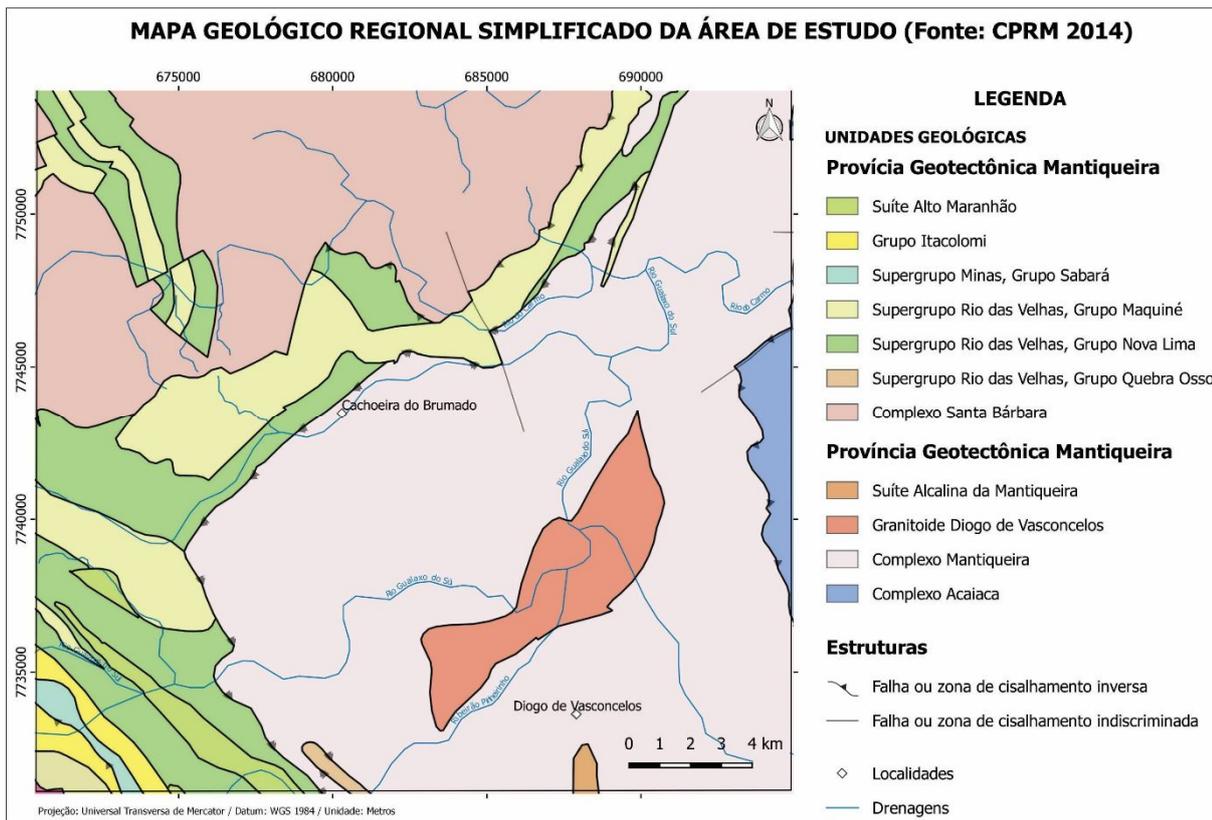


Figura 2.8- Mapa geológico regional simplificado da área de estudo (Modificado de CPRM 2014).

3.1 INTRODUÇÃO

As rochas que compõem a crosta terrestre possuem diferentes propriedades físicas que proporcionam características únicas a cada um dos litotipos. Através de investigações geofísicas, realizadas a partir de medidas em superfície e/ou próximo a ela, é possível obter informações sobre a composição e estrutura do interior da Terra. Tais medidas são influenciadas pela distribuição interna das propriedades físicas, que apresentam variação vertical e lateralmente.

Os levantamentos geofísicos possibilitam delinear as distribuições das propriedades físicas que reflitam a geologia de subsuperfície em determinado local. Embora passíveis de ambiguidades ou incertezas, os métodos de levantamentos geofísicos, utilizados de forma correta e em conjunto, são uma ferramenta eficiente para a identificação e caracterização de feições geológicas.

Neste capítulo serão descritos os fundamentos dos métodos geofísicos utilizados para elaboração deste trabalho: magnetometria e radiometria.

3.2 MAGNETOMETRIA

A magnetometria mede as pequenas variações na intensidade do campo magnético terrestre, que ocorrem por consequência da distribuição irregular das rochas magnetizadas em subsuperfície, isto é, o levantamento magnetométrico baseia-se na variação da amplitude magnética, que se encontra diretamente associada a suscetibilidade magnética dos minerais (Kearey *et al.* 2009).

A magnetização de cada tipo de rocha é dada pela sua susceptibilidade magnética, ou seja, depende da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos - magnetita, ilmenita, pirrotita, etc. - presentes nela. A concentração desses minerais produz distorções locais no campo magnético da Terra, sendo o estudo dessas distorções a base da Magnetometria (Telford *et al.* 1990, Kearey *et al.* 2009).

3.2.1 Campo Magnético Terrestre

As atuais teorias apontam que a fonte do magnetismo terrestre se dá pela interação entre o núcleo interno, composto por ferro e níquel sólidos, e núcleo externo, composto por ferro e elementos leves no estado líquido. Os íons livres do núcleo externo em movimento geram corrente elétrica e essa corrente gera o campo magnético (Kearey *et al.* 2009). Essa proposição é conhecida como Teoria do Dínamo, que explica fenômenos como as inversões de polaridades registradas em algumas rochas com variações seculares.

O campo magnético pode ser representado por um vetor no espaço cujas componentes são definidas na figura 3.1. O campo magnético total T é decomposto em componentes vetoriais denominadas componente horizontal H e componente vertical V . O ângulo entre o campo total T e a componente horizontal H é denominado inclinação magnética (i) e o ângulo que a componente horizontal H faz com o norte geográfico é denominado declinação magnética (d). Por convenção, o campo magnético é positivo no pólo Norte e negativo no pólo Sul.

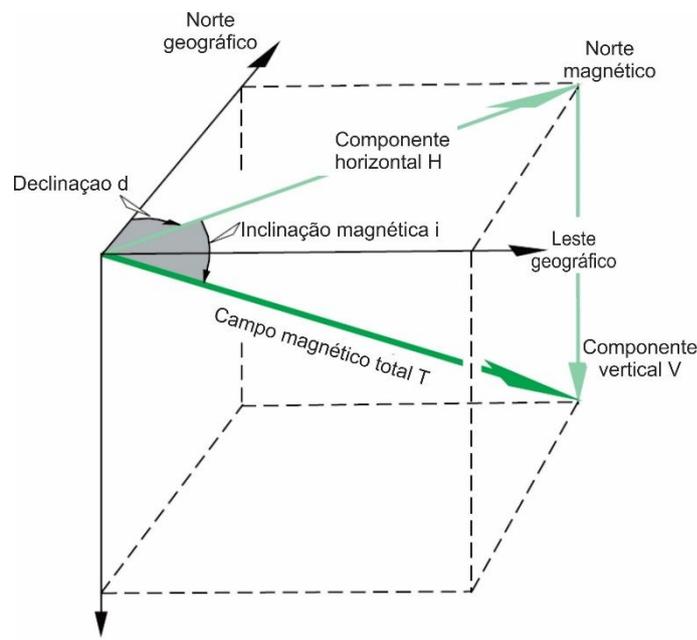


Figura 3.1- Componentes do campo magnético terrestre (modificado de Dentith & Mudge (2014)).

De acordo com Kearey *et al.* (2009), o campo magnético produzido por forças internas no planeta sofre interferência de contribuições externas, a união dos campos produz dois fenômenos que devem ser levados em consideração para análises magnetométricas, a variação diurna e as tempestades magnéticas. A variação diurna é dada pela alternância na

intensidade do campo magnético em um período de 24 horas, resultando em movimentos de aquecimento parcial da ionosfera, devendo ser registrado em levantamentos para que seja feita a correção adequada. O fenômeno das tempestades ocorre em consequência da interação entre o campo magnético principal do planeta e as emissões de plasma solar, esse feito ocasiona a suspensão de um levantamento magnetométrico devido sua intensidade de altos valores.

3.2.2 Susceptibilidade Magnética e Magnetização das Rochas

A susceptibilidade magnética das rochas é condicionada à quantidade de minerais ferromagnéticos presentes e é responsável pela magnetização das mesmas. Devido à pequena quantidade de minerais magnéticos presentes na constituição da maioria das rochas estas possuem baixa susceptibilidade magnética (Kearey *et al.* 2009).

Para a utilização da magnetometria é importante compreender as propriedades magnéticas dos materiais. Segundo Kearey *et al.* (2009), os materiais magnéticos podem ser classificados como diamagnético, paramagnético e ferromagnético, havendo diferenças nas intensidades de sua magnetização, condicionadas pelo *spin* e a trajetória dos elétrons no átomo:

Materiais diamagnéticos: adquirem magnetização de intensidade fraca e sentido contrário ao do campo magnético aplicado. A fraca intensidade da magnetização provém do pequeno valor de susceptibilidade magnética dessas substâncias, ao passo que o sentido contrário ao do campo permite que se atribua um sinal negativo à sua susceptibilidade. Os exemplos de substâncias diamagnéticas são o mármore, o quartzo, a grafita, o feldspato, anidrita, bismuto, cobre, prata, chumbo.

Materiais paramagnéticos: a magnetização ainda é fraca em detrimento de sua baixa susceptibilidade. Quando se aplica um campo magnético externo, seus elétrons sofrem rotação e produzem um campo no mesmo sentido daquele aplicado, causando então uma susceptibilidade positiva. Dentre as substâncias paramagnéticas destacam-se: pirita, biotita, piroxênio, dolomita, sienito, olivina, alumínio, magnésio e sulfato de cobre.

Materiais ferromagnéticos: possuem susceptibilidade magnética elevada e positiva, o que lhes confere uma magnetização de alta intensidade no mesmo sentido do campo. A temperatura de Curie é o ponto limítrofe a partir do qual um material perde a sua característica ferromagnética e passa a se comportar como paramagnética, ou seja, a altas profundidades, as rochas que apresentam minerais com alta susceptibilidade podem perder

sua magnetização, devido à alta temperatura. Dentre os minerais ferromagnéticos tem-se: magnetita, pirrotita, titanomagnetita e maghemita. Corpos intrusivos máficos por vezes com minério em sua composição, são causas comuns de anomalias magnéticas.

A magnetita é o mineral magnético mais comum, sendo responsável por 99% das anomalias magnéticas. Embora seu tamanho, forma e dispersão dos grãos em uma rocha afetem seu caráter magnético, pode-se classificar o comportamento magnético das rochas de acordo seu conteúdo global de magnetita, como ilustrado no histograma da figura 3.2 (Kearey 2009).

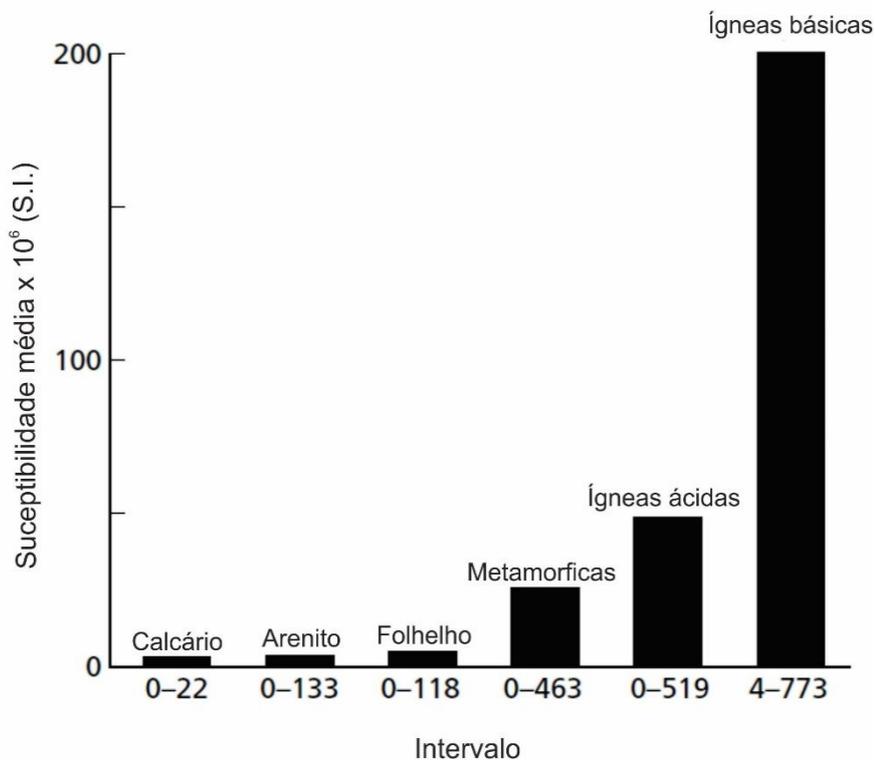


Figura 3.2 - Histograma mostrando os valores médios e os intervalos de susceptibilidade dos tipos de rochas mais comuns (modificado de Kearey *et al.* 2009).

Como pode ser observado na figura 3.2, as rochas ígneas básicas são as que apresentam maior susceptibilidade magnética em razão do seu conteúdo relativamente alto em magnetita. Já as ígneas ácidas apresentam menor proporção de magnetita em sua composição, conseqüentemente menor susceptibilidade magnética. Em contrapartida, as rochas de origem sedimentar, com exceção das formações ferríferas bandadas, apresentam baixa susceptibilidade magnética.

As rochas metamórficas são variáveis em seu conteúdo magnético. Se a pressão parcial de oxigênio for relativamente baixa a magnetita é reabsorvida e o ferro e o oxigênio são incorporados em outras fases minerais com o aumento do grau metamórfico. Além do processo de metamorfismo, deve ser levado em consideração a origem das rochas, Kearey *et al.* (2009).

3.2.3 Anomalias magnéticas

Variações de intensidade, inclinação e declinação que ocorrem no campo magnético total são denominadas anomalias magnéticas. Essas variações dependem da composição das rochas que podem conter ou não minerais com propriedades magnéticas. Todas as anomalias magnéticas causadas por rochas causam interferência no campo magnético normal da Terra.

Os minerais e elementos químicos que compõem a crosta são influenciados de formas diferentes pelo campo magnético terrestre, dependendo da composição e proporção disponível de cada um. Segundo Kearey *et al.* (2009), o campo magnético da Terra provoca um campo secundário induzido nas rochas que contém mineral magnético. Um corpo colocado num campo magnético H adquire uma magnetização induzida M proporcional:

$$M = kH, \text{ sendo } k \text{ a susceptibilidade magnética dos minerais.}$$

Nos levantamentos magnetométricos são realizadas medidas do campo magnético total em determinada posição do espaço, sendo que o campo magnético total é o somatório de toda contribuição magnética do meio, incluindo a rocha sobre investigação, o campo geomagnético, variações magnéticas diurnas ou outras variações magnéticas eventuais de origem externa (Kearey *et al.* 2009). Para se delimitar as anomalias magnéticas é necessário fazer correções para eliminar essas contribuições não desejadas

3.2.4 Filtragem dos Dados

As filtragens são técnicas matemáticas com a finalidade de realçar ou atenuar feições lineares ou planares, separando o sinal produzido pelas fontes de interesse do produzido pelas fontes indesejáveis (ruídos), como os produzidos por heterogeneidades próximas da superfície ou na interferência entre fontes rasas e profundas, permitindo um melhor reconhecimento das anomalias.

A filtragem é realizada utilizando-se a Transformada de Fourier, que manipula os dados no domínio da frequência (Kearey *et al.* 2009). Os principais filtros utilizados são

gradiente vertical, gradiente horizontal, passa alta, passa baixa, passa banda, continuação para cima, derivadas em x, y e z, dentre outros (Tabela 3.1).

Tabela 3.1- Filtros de Fourier com respectivas finalidades geofísicas (modificado de Kearey *et al.* 2009).

Filtros de Fourier		Finalidade Geofísica
Frequência	Passa Banda	Retirar as anomalias relacionadas a um determinado intervalo de frequência.
	Passa Alta	Retirar baixas frequências e evidenciar informações de fontes mais rasas.
	Passa Baixa	Retirar baixas frequências e evidenciar informações de fontes mais rasas.
Continuação	Continuação para baixo	Fornece informações acerca de anomalias mais rasas (filtro altamente estável – geralmente não utilizado).
	Continuação para cima	Filtra altas frequências retirando as anomalias mais rasas e evidenciando as anomalias mais profundas.
Derivada	Gradiente residual	Remove anomalias regionais e evidencia as anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia as estruturas N-S.
	Gradiente horizontal em Y	Evidencia as estruturas em E-W.
	Gradiente vertical	Evidencia as fontes rasas.
	Amplitude do Sinal Analítico	Projeta, em superfície, as anomalias em profundidade.

3.2.5 Deconvolução de Euler

A deconvolução de Euler é a técnica que permite estimar a posição e a profundidade de topo das anomalias magnéticas e gravimétricas em subsuperfície, e é baseada na equação homogênea de Euler (Reid *et al.*, 1990):

$$-\eta T = (x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z}$$

Sendo η a medida de taxa de variação que depende da fonte magnética, $T(x, y, z)$ a anomalia de campo total produzida pela fonte pontual tridimensional localizada na coordenada x_0, y_0, z_0 de um sistema cartesiano dextral.

A deconvolução de Euler não obedece a um determinado modelo geológico, mas a valores experimentais do índice estrutural. O índice estrutural (Tabela 3.2) é usado para interpretar como se dá a homogeneização de um corpo utilizando modelos simplificados, uma vez que as geometrias dos corpos geológicos, que produzem uma anomalia em um campo

potencial, são diferentes e complexas, aparecendo em diferentes latitudes, posições espaciais e profundidades e gerando diferentes tipos de anomalia.

Tabela 3.2- Relação entre índices estruturais e modelos físico e geológico para dados de magnetometria (modificado de Telford 1990).

Método	Modelo	Índice
Magnetometria	Contatos geológicos	1
	Diques finos e soleiras	1,5
	Corpos cilíndricos e diques	2
	Kimberlitos e lamproítos	2,5
	Corpos esféricos e diápiros	3

3.3 RADIOMETRIA

Os levantamentos radiométricos são excelentes no auxílio ao mapeamento geológico de superfície em que as diferentes litologias são reconhecidas pelas distintas assinaturas radioativas. Há mais de 50 isótopos radioativos de ocorrência natural, mas a maioria é rara ou somente muito fracamente radioativa. Os elementos de maior interesse em exploração radiométrica são o equivalente do urânio (^{238}eU), o equivalente do tório (^{232}eTh) e o potássio, (^{40}K). Os isótopos destes elementos químicos desintegram-se espontaneamente e emitem partículas que liberam energia na forma de radiação eletromagnética (Kearey *et al.* 2009).

A interpretação dos dados radiométricos tem como objetivo delimitar áreas com diferentes níveis de radioatividade de elementos equivalentes do urânio, equivalentes do tório e do potássio, elaborando desse modo mapas de unidades radiométricas. Esses mapas indicam de uma forma qualitativa a distribuição dos três radioelementos nos materiais de superfície (Kearey *et al.* 2009).

3.3.1 Radioatividade Natural

Elementos cujos núcleos atômicos contêm o mesmo número de prótons, mas diferentes números de nêutrons, são chamados isótopos. Eles são formas do mesmo elemento químico com diferentes pesos atômicos. Segundo Kearey *et al.* (2009), isto ocorre quando elementos químicos radioativos sofrem decaimento resultando na liberação de partículas, alfa (α), beta (β) e gama (γ).

A penetração dessas partículas é distinta, sendo algumas dezenas de centímetros no caso das partículas gama e praticamente zero nas partículas alfa e beta, por isso a radiometria

proporciona um resultado superficial. As partículas alfa não podem ser detectadas em levantamentos radiométricos, e as partículas beta, somente em levantamentos de solo. Apenas os raios gama podem ser detectados em levantamentos aerotransportados (Kearey *et al.* 2009).

Para quantificação das emissões de radiação são utilizados os contadores Geiger, cintilômetros, espectrômetros de raios gama e medidores de emanações de radônio. Todos esses equipamentos apresentam como resultado contagem de emissões por um período de tempo fixo (Kearey *et al.* 2009).

3.3.2 Radioatividade das Rochas e Minerais

Como os elementos equivalente urânio (^{238}eU), o equivalente tório (^{232}eTh) e o potássio (^{40}K) são responsáveis pela radioatividade natural das rochas (Figura 3.3), estes constituem os principais interesses nos levantamentos radiométricos.

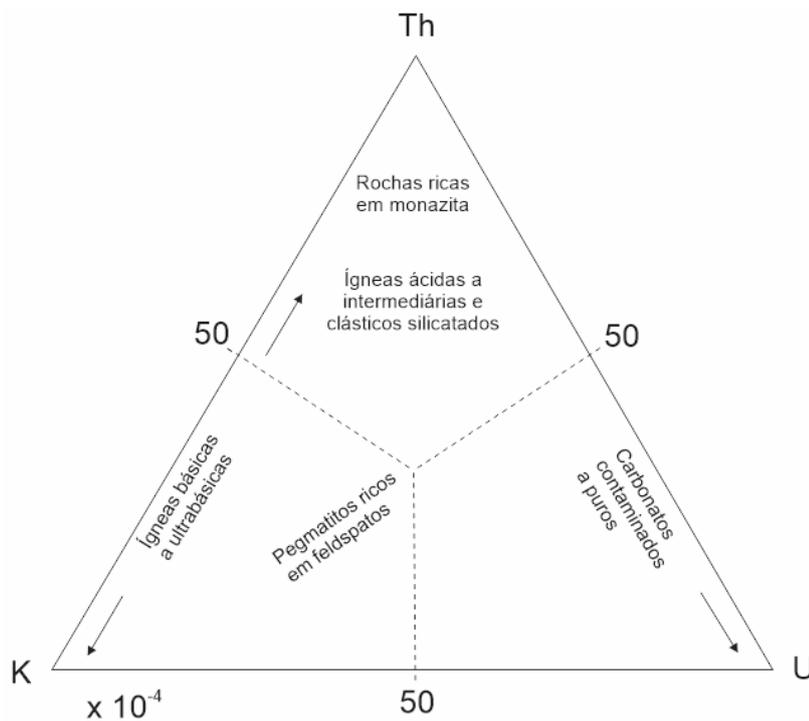


Figura 3.3- O gráfico ternário mostrando a abundância relativa de elementos radioativos em diferentes tipos de rochas (modificado de Kearey *et al.* 2009).

A transformação das contagens por segundo em concentrações de K (potássio - %), eU (equivalente urânio - ppm) e eTh (equivalente tório - ppm) possibilita extração de informações que auxiliam, por exemplo, na identificação de áreas alteradas hidrotermalmente

e explorar suas relações com os processos mineralizantes em vários ambientes geológicos (Dickson & Scott 1997).

A presença de elementos radioativos pode ser correlacionada à presença de sílica nas rochas ígneas (Figura 3.4), sendo que há maior presença de elementos radioativos em rochas ácidas, em relação às intermediárias, básicas e ultrabásicas. Andesitos com baixo teor em potássio, vulcânicas intermediárias e vulcânicas ácidas têm um relativo aumento no conteúdo de tório e baixos valores para urânio e potássio, ao passo que vulcânicas ultramáficas, vulcânicas máficas e intrusivas máficas têm baixos conteúdos de elementos radioativos, mas com relativo aumento no conteúdo de tório (Dickson & Scott 1997).

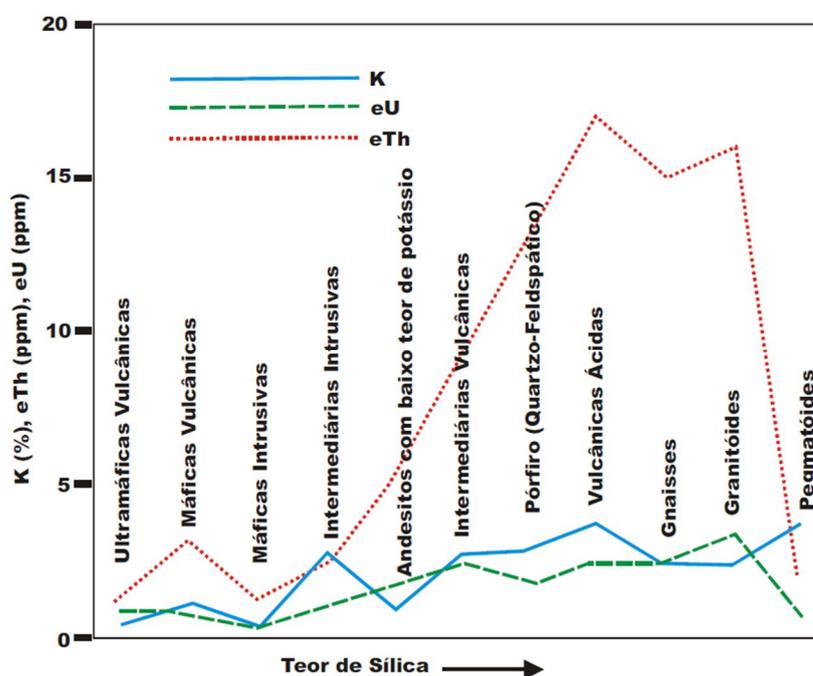


Figura 3.4- Variação na média do conteúdo de K, eTh, eU para rochas ígneas intrusivas e extrusivas com aumento no conteúdo de sílica (modificado de Dickson & Scott 1997).

Rochas sedimentares geralmente refletem o conteúdo de radioelementos da rocha fonte. Em sedimentos imaturos derivados de rochas graníticas pode-se esperar um aumento no seu conteúdo, mas em sedimentos imaturos ricos em quartzo pode-se esperar baixos valores. Os dados disponíveis para rochas metamórficas sugerem que, dependendo de qual protólito originou-se a rocha o metamorfismo não afeta o conteúdo dos radioelementos. Em geral, a radioatividade em rochas sedimentares e sedimentos metamorfizados é mais alta que em rochas ígneas e outros tipos de metamórfica, com exceção de granitos ricos em potássio (Telford *et al.* 1990).

Telford *et al.* (1990), apresentou uma relação entre os radioelementos usados nos levantamentos e os minerais radioativos mais comuns, assim como seus modos de ocorrência (Tabela 3.2). Segundo Kearey *et al.* (2009), a natureza do mineral em que o radioisótopo é encontrado é irrelevante para fins de detecção, pois as técnicas de prospecção localizam o próprio elemento.

Tabela 3.2- Principais minerais radioativos e modos de ocorrência (modificado de Telford *et al.* 1990).

Mineral Radioativo	Mineral	Ocorrência
Potássio (K)	Feldspato ortoclásio e microclínio	Principais constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos.
	Muscovita	
	Alunita	
Tório (Th)	Silvita, carnalita	Depósitos salinos em sedimentos.
	Monazita	Granitos, pegmatitos, gnaisses.
	Torianita	Granitos, pegmatitos pláceres.
Torita, uranotorita		
Urânio (U)	Uraninita	Granitos, pegmatitos, veios de Ag, Pb, Cu, etc..
	Carnotita	Arenitos.
	Gumita	Associação à uraninita.

O urânio como mineral primário é encontrado principalmente em minerais à base de óxido e em silicatos, já o urânio proveniente de processos de intemperismo, concentram-se em óxidos de ferro e argilominerais (Telford *et al.* 1990). O tório é obtido pela quebra de minerais em processos intempéricos, concentrando-se em minerais hidratados ou oxidados de ferro/titânio e argilominerais, sendo que os principais minerais de tório são a monazita e o zircão. O potássio é um bom indicativo de hidrotermalismo, gerando a alteração potássica, composta por feldspato potássico e/ou biotita (Dickson & Scott 1997).

Para o uso em exploração e pesquisa mineral usando a radiometria, são mais comuns os mapas de razão entre os elementos do que os de concentração absoluta (canais de U, Th e K). Os mapas de razão são mais eficientes para encontrar materiais localizados, ao invés de analisar *trends* estruturais ou distribuição dos tipos de rocha, como nos mapas de concentração absoluta (Ostrovskiy 1975).

CAPÍTULO 4

ANÁLISE QUALITATIVA

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a análise qualitativa dos mapas temáticos magnetométricos e radiométricos gerados, além da metodologia aplicada na obtenção destes. Posteriormente é apresentada a integração das informações geofísicas com os dados geológicos da área de estudos.

4.2 BANCO DE DADOS

O banco de dados geofísicos utilizado foi proveniente do Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais realizado pela Companhia de Desenvolvimento Energético de Minas Gerais (CODEMIG) no ano de 2001, que compreende seis regiões do estado que foram determinadas com base na expressividade do potencial mineral e pelas características propícias à descoberta de novos depósitos.

Para o estudo da região sudeste nas adjacências do Quadrilátero Ferrífero (QFe), que compreende a área deste trabalho, foi utilizado o banco de dados da Área 02 – Pitangui – São João Del-Rei – Ipatinga. Na realização do levantamento aerogeofísico da Área 2, esta foi dividida em bloco Oeste, que abrange uma área de 21.564 Km², e bloco Leste, com uma área de cobertura de 13.611 Km². A área de interesse neste trabalho está inserida no bloco Leste (Figura 4.1).

Somando-se todas as seis áreas, o levantamento cobriu 72.774 Km², o equivalente a 230.074 km lineares de voo – cerca de 12,5% do território mineiro. Aviões especializados sobrevoaram as áreas selecionadas a 100 m de altitude, com espaçamento de 250 m entre linhas de voo. Neste processo foram empregados os métodos magnetométricos e radiométricos.

Para o levantamento de dados foram utilizadas duas aeronaves Cessna, modelo 404 – Titan, equipadas com magnetômetro de bombeamento ótico de vapor de césio da Geometrics, modelo G-822, radiômetro Exploranium, modelo GR-820, e sistema de navegação GPS Sercel NR-103 de 10 canais (Lasa 2001). Os parâmetros utilizados no levantamento tiveram

as seguintes características: linhas de voo com direção N30W; espaçamento de 2500 m entre linhas de voo; linhas de controle com direção N60E; espaçamento entre linhas de controle igual a 2500 m; intervalo entre medições geofísicas consecutivas 0,1 s para o magnetômetro e 1,0 s para o espectrômetro; altura de voo igual a 100 m e velocidade aproximada igual a 280 km/h; sistema de navegação GPS Picodas/NovAtel/Racal.

A precisão do sensor Geometrics G-822 utilizado para a obtenção dos dados magnetométricos é de 0,001 nT e opera na faixa de 20000 – 95000 nT. As leituras foram realizadas a cada 0,1 segundo, o que equivale , para a velocidade de 280 km/h da aeronave, a aproximadamente 8 metros no terreno.

O gamaespectrômetro utilizado na aquisição de dados é o EXPLORANIUM, modelo GR820 e possui 256 canais espectrais. O espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação precisa dos Fotografia picos de Urânio, Tório e Potássio. A cada cristal é aplicada uma correção linear individual, mantendo o espectro permanentemente alinhado. As leituras do gamaespectrômetro são realizadas a cada segundo, representando medições a intervalos de aproximadamente 80 m no terreno.

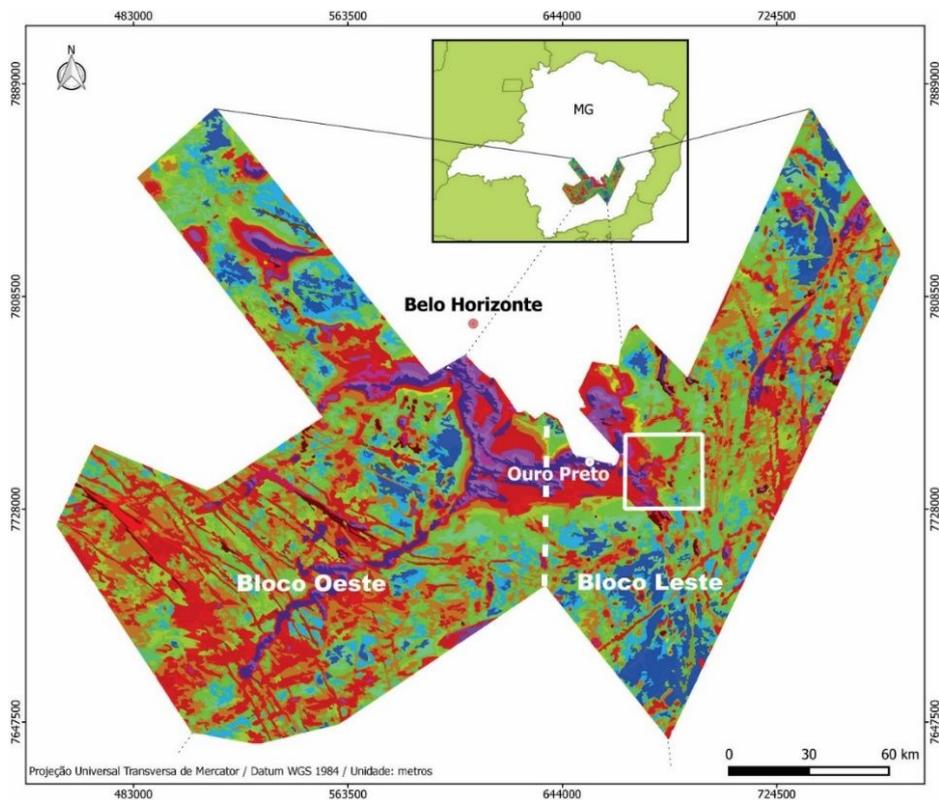


Figura 4.1- Área 2 do levantamento da CODEMIG, dividida em bloco Oeste e bloco Leste, com o mapa temático de amplitude de sinal analítico e a área estudada enfatizada em cor branca.

4.3 METODOLOGIA DE GERAÇÃO DOS MAPAS E IMAGENS

Inicialmente fez-se uma análise morfoestrutural identificando os principais lineamentos a partir de uma imagem SRTM extraída do site da *United States Geological Survey (USGS)*, da qual foi gerado o relevo sombreado no *software QGis 2.12.2* através da ferramenta *Análise de Terreno* onde foram adotados os parâmetros direção azimutal do Sol igual a 315° e inclinação de 50° (Figura 4.2).

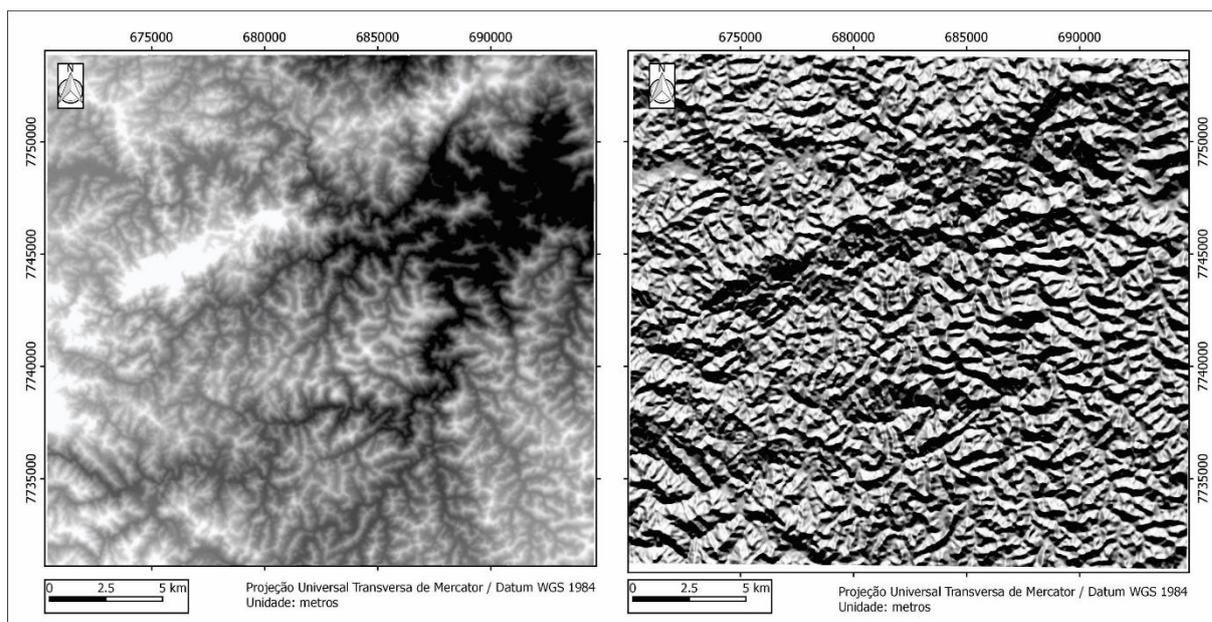


Figura 4.2- À esquerda, imagem SRTM. À direita, imagem de relevo sombreado gerada a partir da imagem SRTM.

Os mapas geofísicos foram gerados por meio do *Software Oasis Montaj 7.0.1*. A primeira etapa consistiu em fazer a interpolação do grid dos dados geofísicos de campo anômalo, para a magnetometria, e dos canais de K, eTh e eU e contagem total, para a radiometria, pelo método de mínima curvatura afim de gerar mapas em malha regular de 350 m. Em seguida, através da rotina MAGMAP do *Oasis Montaj 7.0.1*, foram aplicados uma sequência de filtros para confecção dos mapas temáticos 2,5D magnetométricos de campo anômalo (CA), amplitude do sinal analítico (ASA), derivada horizontal em x (Dx), derivada horizontal em y (Dy), derivada vertical (Dz) e a segunda derivada em Z (D^2z), continuação para cima de 500, 1000, 2500 e 5000 (Up500, Up1000, Up2500 e Up5000 respectivamente), além dos mapas radiométricos dos canais K, eTh, eU, contagem total, eTh/K, eU/K, eU/eTh, a imagem ternária e mapa de parâmetro F.

Posteriormente fez-se a utilização do *software QGis 2.12.2* para a integração dos diferentes mapas temáticos e confecção de mapas de magnetofácies e radiofácies.

A Figura 4.3 apresenta um fluxograma com os mapas magnetométricos temáticos confeccionados para esse estudo e as respectivas etapas de elaboração.

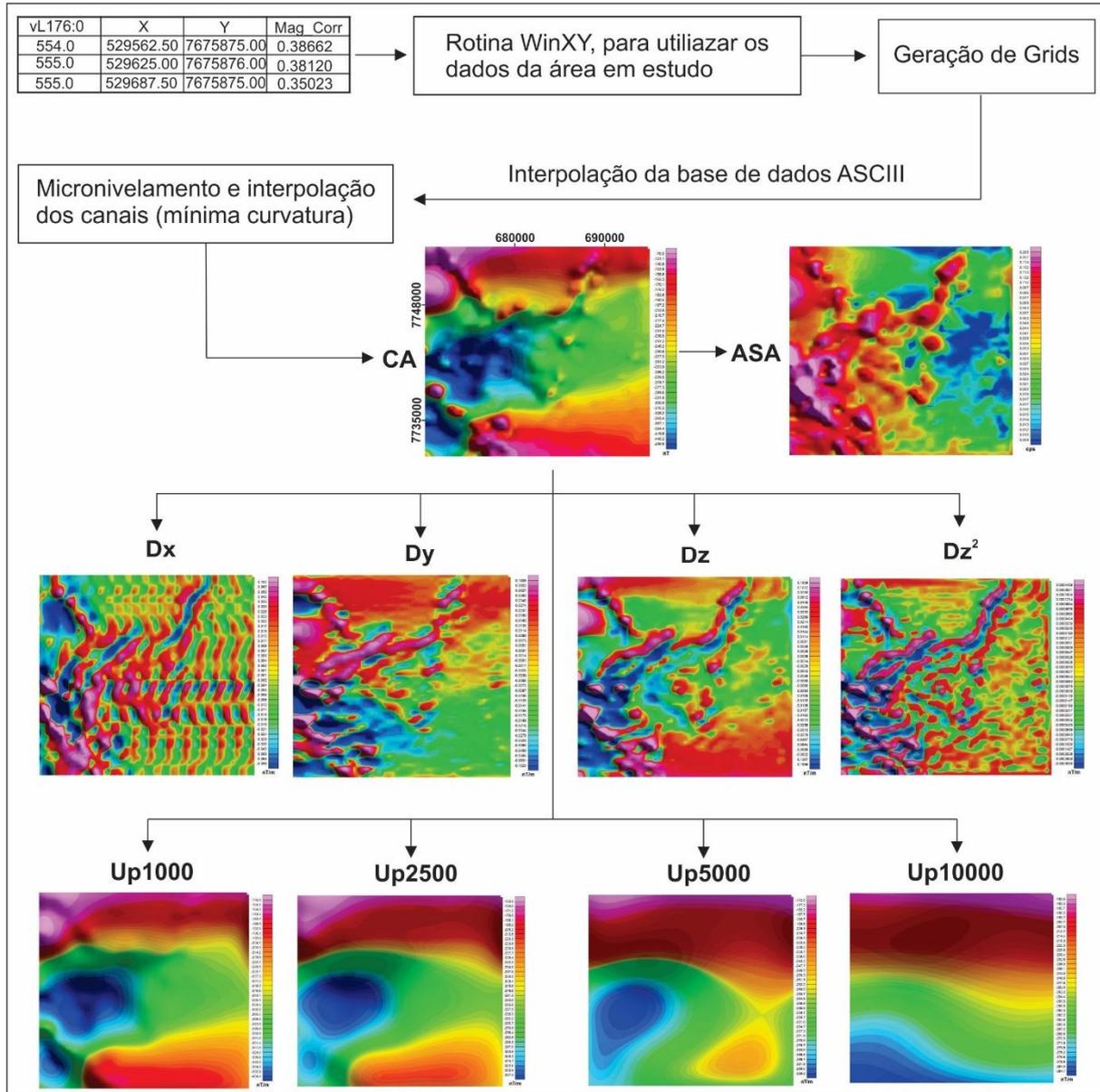


Figura 4.3- Fluxograma exibindo a metodologia utilizada para a geração dos *grids* em mapas magnetométricos. CA – campo magnético anômalo; ASA – amplitude do sinal analítico; Dx – primeira derivada horizontal (EW); Dy – primeira derivada horizontal (NS); Dz – primeira derivada vertical; D²z – segunda derivada vertical. Up1000, Up2500, Up5000 e Up10000 – continuação para cima de 1000, 2500, 5000 e 10000 metros.

Assim como os dados magnetométricos, os dados radiométricos foram submetidos aos processos da rotina do *Software Oasis Montaj 7.0.1*. A seguir tem-se um fluxograma do processo de geração dos mapas radiométricos neste *software* (Figura 4.4).

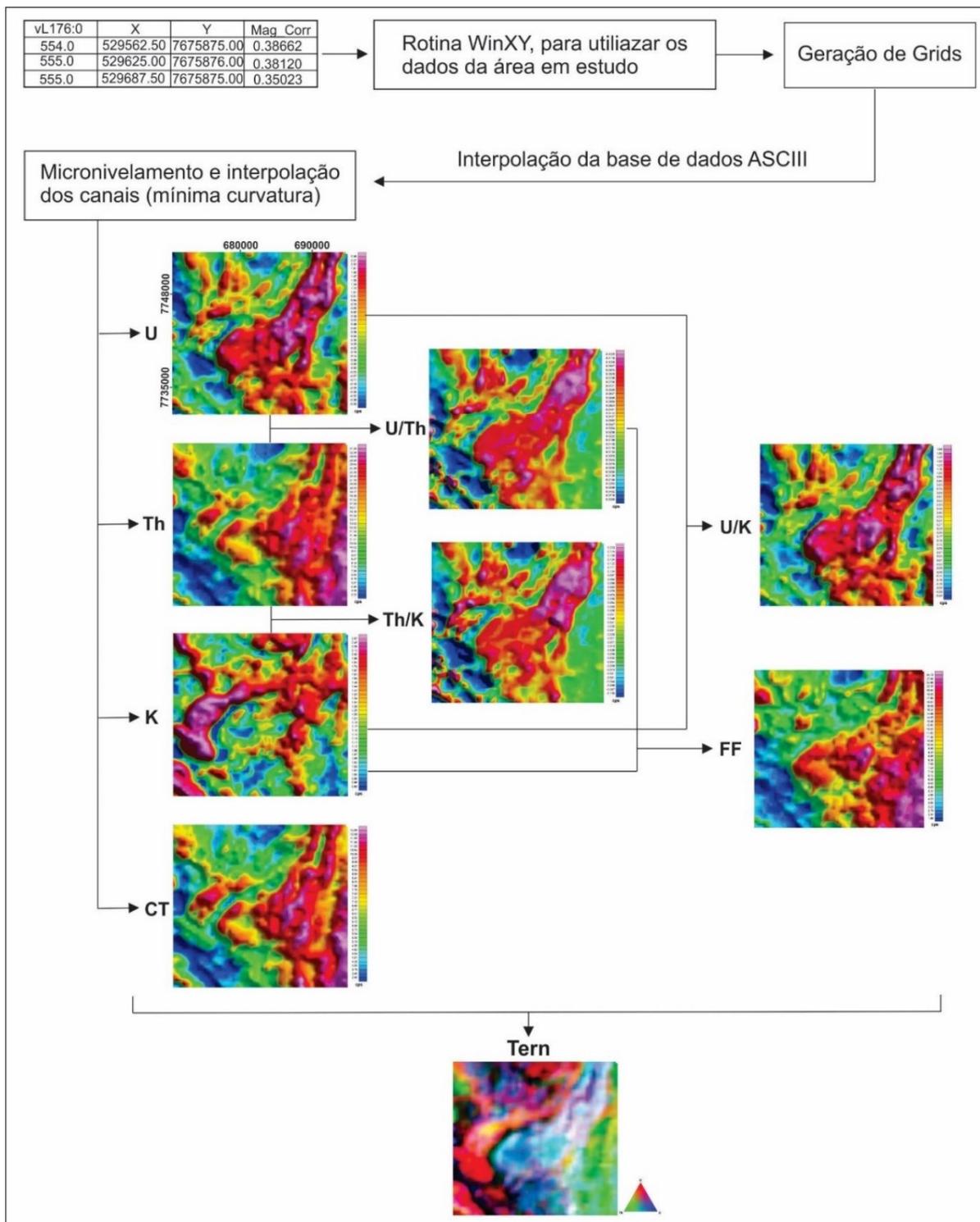


Figura 4.4- Fluxograma exibindo a metodologia utilizada para a geração dos grids em mapas radiométricos. U – canal de urânio; Th – canal de tório; K – canal de potássio; CT – contagem total; U/Th, Th/K, U/K – razão dos respectivos elementos; FF – parâmetro F ; Tern- imagem ternária.

4.4 INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA

4.4.1 Análise morfoestrutural

Segundo Filho (2009), os lineamentos morfoestruturais refletem fenômenos de subsuperfície que podem estar associados a movimento diferencial de blocos falhados. A interpretação destes lineamentos pode levar ao reconhecimento de falhas no terreno, visto que estes representam importantes elementos para interpretar o contexto tectônico de uma determinada área.

Foram traçados 78 lineamentos morfoestruturais (Figura 4.5) cuja direção preferencial é noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste, de acordo com o diagrama de rosetas gerado, com destaque para o grande lineamento de direção nordeste-sudoeste, na parte nordeste da área, com prolongamento para sudoeste, que apresenta feição com maior rugosidade em relação as adjacências. De forma similar, o sudoeste apresenta diversos lineamentos e uma rugosidade elevada, porém a direção preferencial neste caso é noroeste-sudeste. Além deste, há lineamentos por toda a área que podem ser correlacionados com os mapas geofísicos gerados, como será visto adiante.

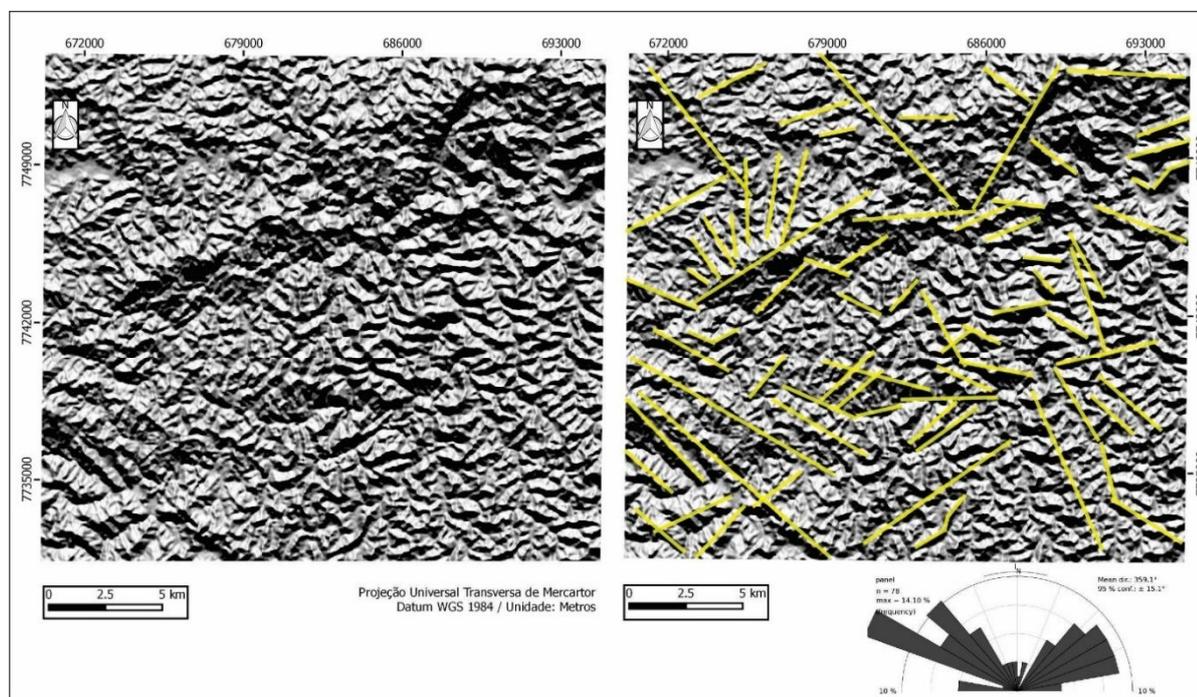


Figura 4.5- Imagem de relevo sombreado gerada a partir de imagem SRTM, com os principais lineamentos traçados.

4.4.2 Magnetometria

Os mapas magnetométricos fornecem informações a respeito da susceptibilidade magnética das rochas. A análise da amplitude das anomalias produzidas por corpos geológicos portadores de minerais magnéticos, auxilia na identificação, delimitação e interpretação de feições estruturais em profundidades. A interpretação destes mapas ocorre por meio de reconhecimento de lineamentos, que podem evidenciar estruturas geológicas como falhas, fraturas e dobras, além da identificação e separação de magnetofácies.

Para a interpretação das anomalias magnetométricas utilizou-se o mapa temático de amplitude de sinal analítico (ASA), que devido sua característica monopolar, expõe as anomalias de forma centrada em comparação aos mapas de caráter dipolar (Kearey *et al.* 2009). Embora o mapa ASA seja usado prioritariamente, os demais mapas magnetométricos gerados foram de suma importância para correlação e comparação com informações da imagem de Relevô Sombreado, com outros mapas geofísicos e com informações da geologia.

Na figura 4.6, a seguir, é apresentado o mapa ASA com a identificação de 3 magnetofácies, com as informações dos intervalos de susceptibilidade magnética apresentadas na Tabela 4.1. As imagens geradas apresentam a intensidade do sinal magnético em uma escala de cor, onde os tons azuis indicam baixos magnéticos, os tons avermelhados a magenta indicam os altos magnéticos e verde a amarelado indicam valores intermediários.

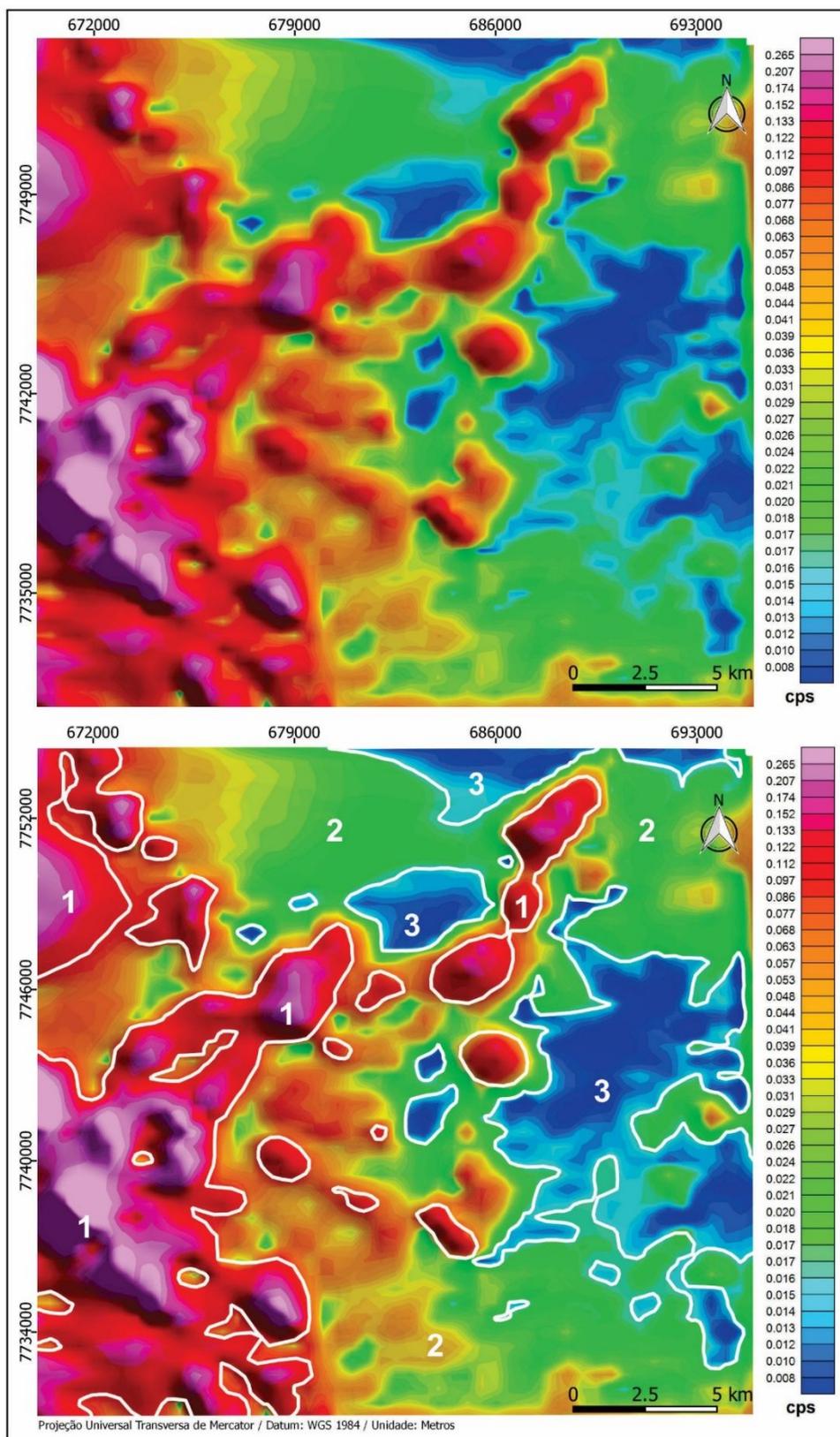


Figura 4.6- Acima é apresentado o mapa de amplitude de sinal analítico (ASA) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão de magnetofácies.

Tabela 4.1- Relação das magnetofácies com as intensidades de magnetização no mapa de amplitude de sinal analítico e principais litologias associadas a cada uma das magnetofácies, segundo mapa geológico da CPRM (2014).

Magnetofácies	Características geofísicas	Principais litotipos associadas
1	Associada a estruturas de forte resposta magnética, apresentando anomalias de alta amplitude e pequenos comprimentos de onda, que tem valores de intensidade entre 0,077 a 0,267.	Xistos metassedimentares e vulcânicos, filitos e quartzitos, granodioritos.
2	Associada a estruturas com resposta magnética moderada, cujas anomalias apresentam intensidade variando entre 0,017 a 0,777nT/m.	Ortognaisses e granitos
3	Associada a estruturas de baixa resposta magnética, apresentando anomalias de baixas amplitudes e altos comprimentos de onda, compreendendo valores de intensidade entre 0,008 a 0,017.	Ortognaisses e granitos

A partir do mapa de amplitude de sinal analítico (ASA) foram traçados 98 lineamentos (Figura 4.7). Tais lineamentos apresentam direção preferencial leste-oeste e norte-sul como pode ser verificado no diagrama de rosetas que segue juntamente com o mapa. Os lineamentos refletem estruturas de sub superfície como falhas e/ou zonas de cisalhamento associadas com dobras. A anomalia magnetométrica na região sudoeste da área, com concavidade para leste e que apresenta um prolongamento para nordeste, está associada com o limite das PGSF e PGM.

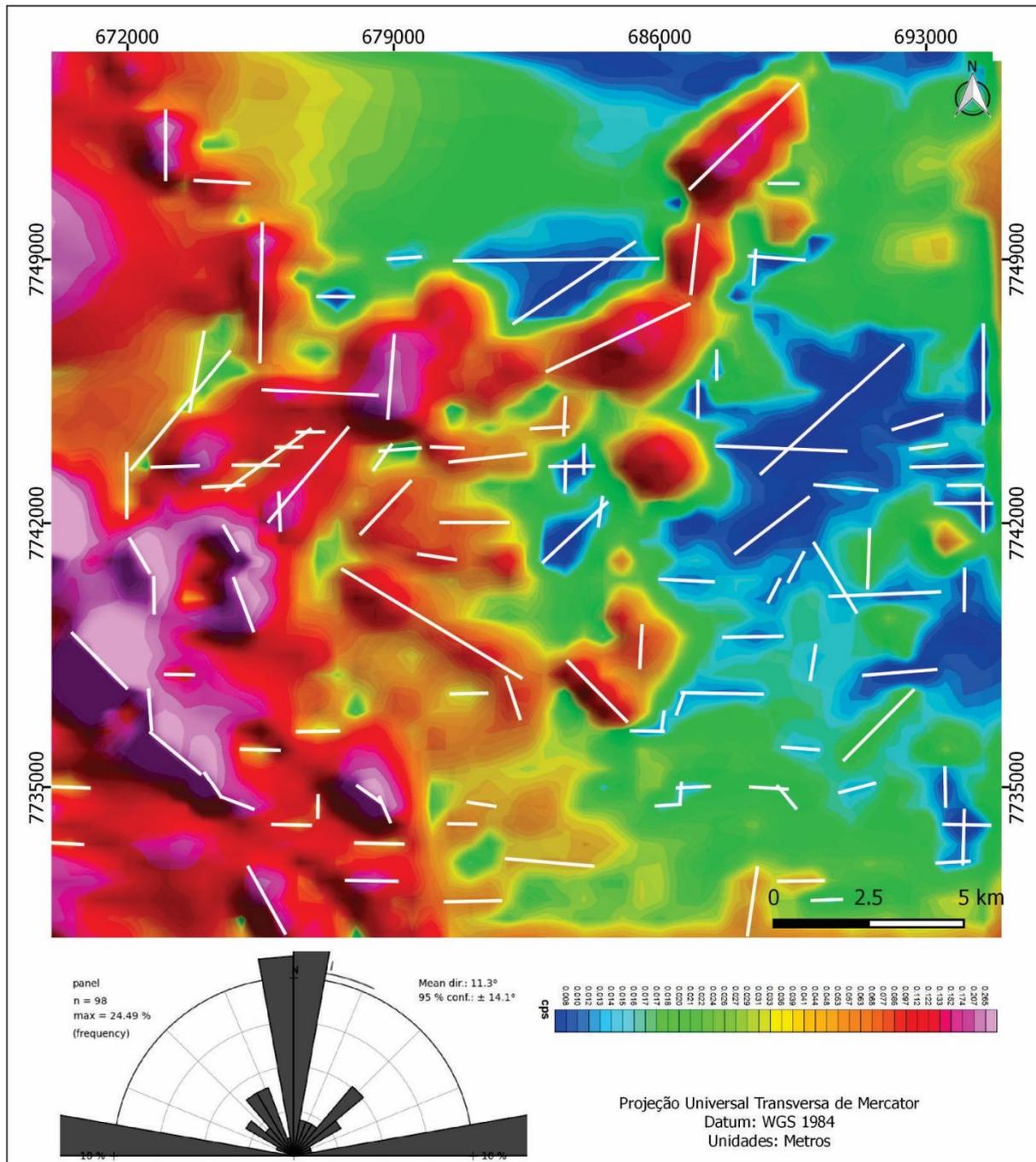


Figura 4.7- Mapa de temático de amplitude de sinal analítico (ASA) com lineamentos traçados e diagrama de roseta mostrando as direções preferenciais.

A derivada vertical (Dz) é responsável por realçar estruturas superficiais, enquanto a segunda derivada vertical (D^2z) é responsável por remover as anomalias regionais e ressaltar as anomalias locais.

Usando o mapa temático da segunda derivada vertical (D^2z), foram traçados 126 lineamentos que possuem direções preferenciais norte-sul e leste-oeste (Figura 4.8), como

pode ser observado no diagrama de rosetas. Em menor quantidade, há lineamentos com direções noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste. Estes lineamentos, apesar de aparecerem em menor quantidade, destacam-se pela escala regional. Além disso, estes lineamentos aparecem em grande parte associados aos altos magnéticos das áreas que limitam as PGM e PGSF. Ainda há um lineamento regional de direção noroeste-sudeste, no noroeste da área, que pode estar associado com a zona de cisalhamento Água Quente (Madeira *et al.* 2017, Rossi 2014).

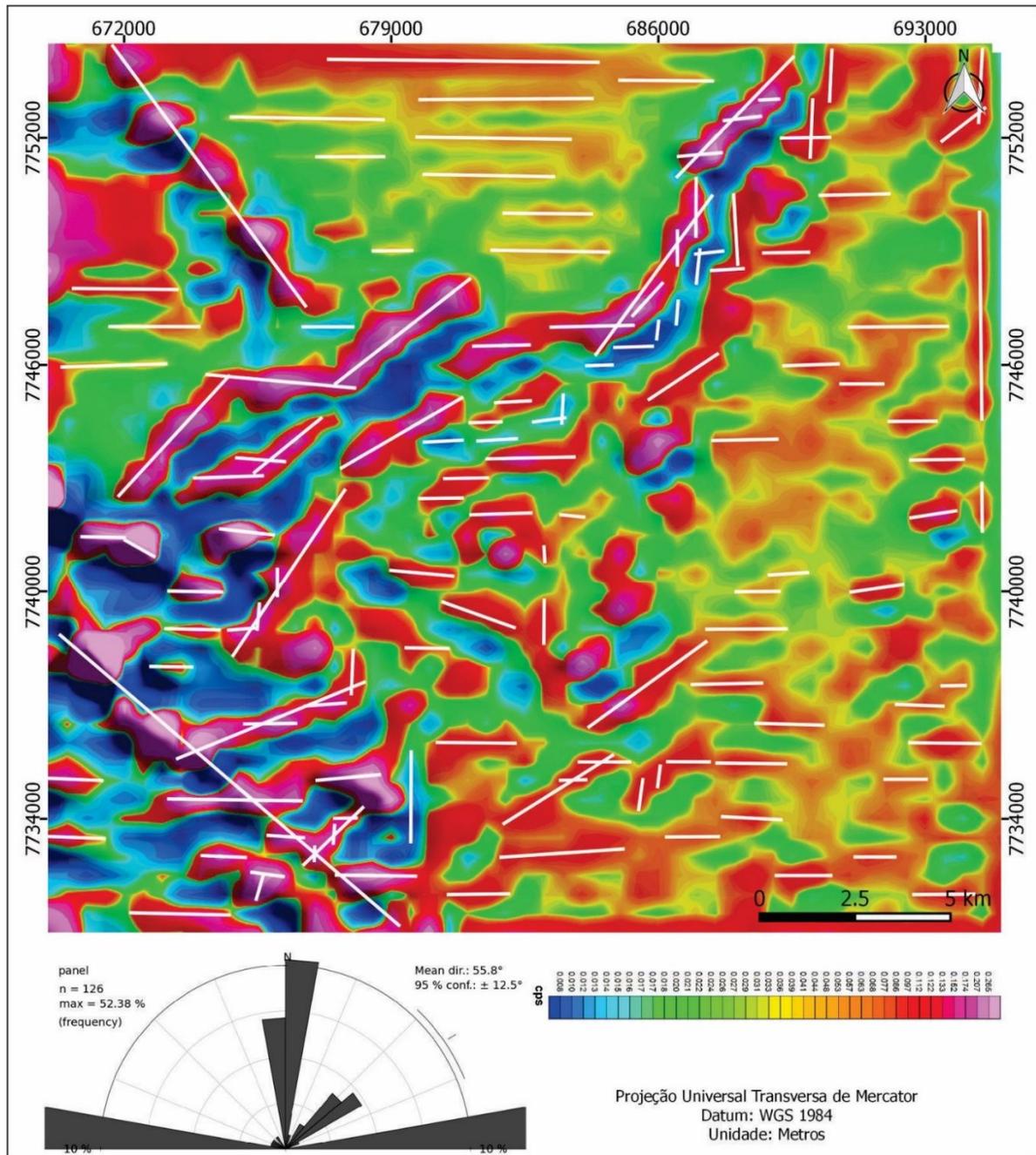


Figura 4.8- Mapa temático da segunda derivada vertical (D^2z) com lineamentos traçados e diagrama de rosetas mostrando a direção preferencial.

4.4.3 Radiometria

A análise qualitativa radiométrica teve como objetivo identificar áreas de acordo as concentrações dos radioelementos equivalente Urânio (^{238}eU), equivalente Tório (^{232}eTh) e Potássio (^{40}K). Os mapas temáticos radiométricos e a imagem ternária possuem excelente aplicabilidade quando suas anomalias são relacionadas às variações litológicas e auxiliam na identificação de diferentes tipos de rochas, uma vez que os radioelementos são litófilos, por isso o método mostra uma importante e eficiente ferramenta no apoio a mapeamentos geológicos.

Os mapas gerados e utilizados no estudo foram de concentração absoluta dos canais de K, eTh e eU, contagem total, razões eU/eTh, eU/K e eTh/K, parâmetro F (K.eU/eTh) e imagem ternária.

Por meio da interpretação do mapa do canal de equivalente Tório foram definidas três radiofácies, como apresentadas na Figura 4.9 e Tabela 4.2.

Observa-se que a parte central e leste do mapa possuem altos teores de tório, sendo a distribuição crescente na direção leste-sudeste, coincidente com o domínio das rochas da PGM onde ocorrem majoritariamente ortognaisses bandados, delimitando a radiofácies 1. Áreas isoladas com altos valores de concentração de eTh também podem ser observadas na porção noroeste da área, coincidente com rochas do Supergrupo Rio das Velhas.

Os mais baixos teores de tório, radiofácies 3, ocorrem na porção sudoeste da área, coincidente com rochas intrusivas ácidas da suíte Alto Maranhão, bem como xistos metassedimentares e vulcânicos, filitos e quartzitos do Supergrupo Rio das Velhas. Áreas isoladas com baixos valores de contração de eTh ainda ocorrem na parte norte do mapa, coincidente com o domínio do complexo Santa Bárbara, com ocorrência de gnaisses e granitos.

Distribuído na parte sul, norte e noroeste da área estão os teores intermediários de eTh, radiofácies 2. Esta radiofácies cobre áreas representadas pelas rochas do complexo Mantiqueira, complexo Santa Bárbara e Supergrupo Rio das Velhas.

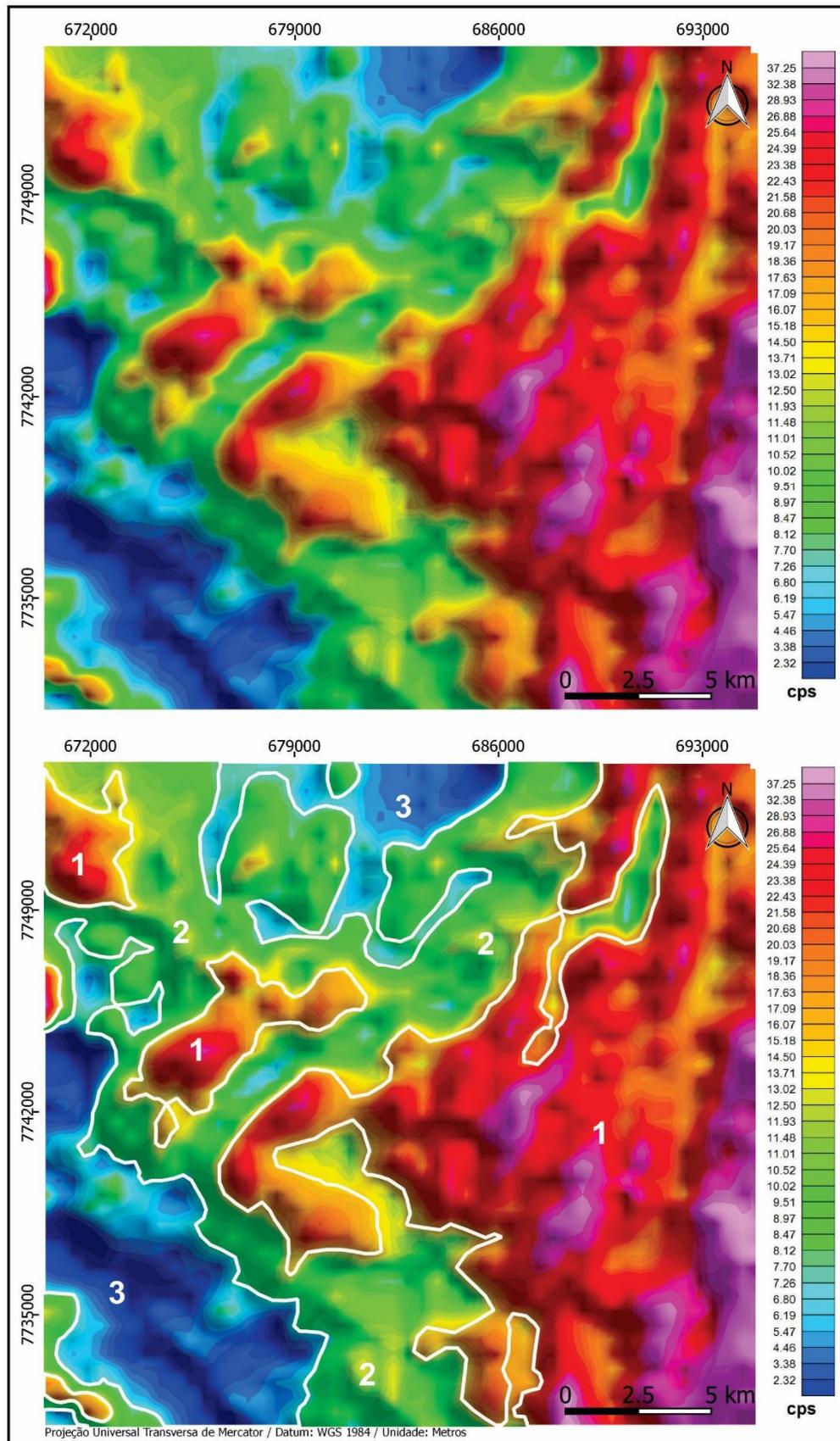


Figura 4.9- Acima é apresentado o mapa do canal de tório (Th) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão de radiofácies.

Tabela 4.2- Radiofácies identificadas a partir da análise do mapa temático do canal de Th, valores do conteúdo radioativo em contagem por segundo (cps) e principais litologias associadas a cada uma das radiofácies, segundo mapa geológico da CPRM (2014).

Radiofácies	Conteúdo radioativo (Th)	Principais litotipos associados
Radiofácies 1	Alto, com valores entre 17,09 e 32,38	Ortognaisses, anfíbolitos, metaultramáficas.
Radiofácies 2	Moderado, com valores entre 8,12 a 17,09	Ortognaisses, anfíbolitos, metaultramáficas, granitos, xistos metassedimentares e vulcânicos, filitos, quartzitos, FFB.
Radiofácies 3	Baixo, com valores entre 2,32 a 8,12	Xistos metassedimentares e vulcânicos, filitos, quartzitos, FFB, granitos e granodioritos.

Assim como no mapa temático do canal de eTh, a imagem ternária também foi dividida em radiofácies (Figura 4.10). Esta imagem representa a variação dos três radioisótopos (eU, K e eTh) em um mesmo mapa através de um diagrama ternário. As regiões em vermelho, verde e azul representam as áreas com altos valores de Potássio (K), equivalente Tório (eTh) e equivalente Urânio (eU), respectivamente. Além destas, há colorações brancas ou pretas que são interpretadas como proporção similar dos teores de K, eTh e eU. O que diferencia estas últimas regiões é a proporção do teor dos radioisótopos, que pode ser alta ou baixa, porém não há um consenso na literatura que mostre se a cor branca corresponde a altos valores ou se a cor preta é a que representa os baixos valores.

A Figura 4.10 mostra o mapa radiométrico ternário e a delimitação das radiofácies. É de fácil identificação as duas radiofácies que possuem características bastante distintas e aparecem bem definidas separadas por um lineamento que inicialmente tem direção nordeste-sudoeste, na porção nordeste, e na direção sul tende a assumir direção noroeste-sudeste. Esta divisão é coincidente com o limite de rochas que compõem os domínios geotectônicos São Francisco e Mantiqueira, como também pode ser observado nos lineamentos da imagem de Relevo Sombreado e nos mapas magnetométricos de amplitude de sinal analítico (ASA), segunda derivada vertical (D^2z) e equivalente de Tório (eTh). A linha pontilhada na Figura 4.6 mostra a divisão destas duas radiofácies (*A* e *B*), que ainda foram subdivididas em outras seis (Tabela 4.2).

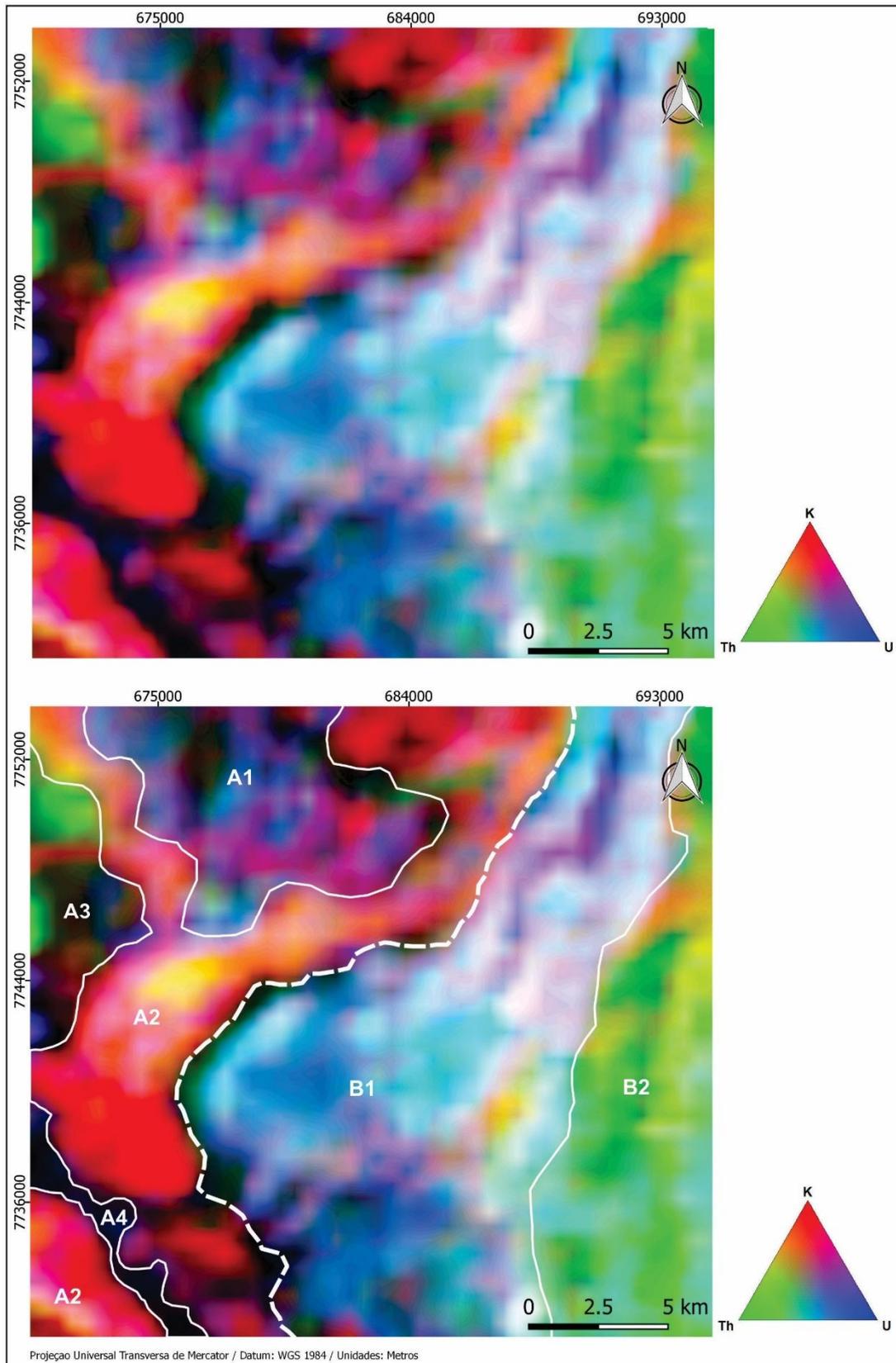


Figura 4.10- Acima é apresentado o mapa ternário (Ter) e abaixo o mesmo mapa interpretado com a divisão de radiofácies e a numeração segundo a Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Radiofácies com respectivos valores relativos de acordo a imagem ternária.

Radiofácies		Teores relativos de U, K, Th
Radiofácies A	Radiofácies A1	U _a , K _m , Th _b
	Radiofácies A2	U _b , K _a , Th _b
	Radiofácies A3	U _m , K _b , Th _a
	Radiofácies A4	U _a , K _b , Th _b
Radiofácies B	Radiofácies B1	U _m , K _b , Th _b
	Radiofácies B2	U _b , K _b , Th _a

Analisando a imagem ternária (Figura 4.10), observa-se que a porção leste, correspondente a radiofácies *B*, possui baixos ou nenhum teor de Potássio, ao contrário da radiofácies *A*, que tem altos teores deste radioelemento. As áreas de cor branca estão majoritariamente na radiofácies *B*, aparecendo como uma faixa que vai da parte sul, passando pelo centro e chegando até nordeste do mapa.

A principal integração entre geofísica e geologia foi obtida pela comparação entre a imagem ternária e o mapa geológico da área estudada (Figura 4.11). As radiofácies *A* e *B* estão claramente associadas as litologias, mais precisamente àquelas da Província Geotectônica São Francisco e Província Geotectônica Mantiqueira, respectivamente.

As radiofácies *A1* e *A3* podem ser correlacionadas as rochas graníticas e gnáissicas tonalíticos a trondhjemiticos do complexo Santa Bárbara (Figura 4.11). Na imagem ternária observam-se altos valores de equivalente de Urânio, baixos de equivalente Tório e valores intermediários do radioelemento Potássio, na radiofácies *A1*. Já na radiofácies *A3* o equivalente Tório possui altos valores, enquanto equivalente Urânio e Potássio aparecem com concentrações intermediários a baixas, respectivamente.

A radiofácies *A2* aparece correlacionada as rochas do Supergrupo Rio das Velhas uma estreita faixa do Grupo Sabará e Grupo Itacolomi, dobradas pelo cavalgamento das rochas da PGM com vergência para oeste. Representando o Supergrupo Rio das Velhas, na maior parte da área estudada, estão as rochas dos grupos Nova Lima e Maquiné. Esta radiofácies apresenta valores baixos a intermediários dos radioelementos equivalente Urânio e Potássio, e elevados valores de equivalente Tório em toda sua extensão. O lineamento observado na parte noroeste desta radiofácies é condizente com a faixa de rochas do Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné, mostrada no mapa geológico da (Figura 4.11).

A radiofácies *A4* possui geometria alongada com direção noroeste-sudeste, possui altos valores de equivalente Urânio, e baixos teores de Potássio e equivalente Tório. Na imagem ternária (Figura 4.10) a coloração desta radiofácies é azul escuro, quase se confundindo com a cor preta. Devido aos altos valores de equivalente Urânio, esta radiofácies foi associada aos granitoides da suíte Alto Maranhão, que deve ter seu contato checado em campo e ajustado nas cartas geológicas.

As radiofácies *B1* e *B2* ocorrem do domínio da Província Geotectônica Mantiqueira e estão associadas às rochas do complexo homônimo. A radiofácies *B1* apresenta, em algumas partes, coloração esbranquiçada, que foi definida como altos valores dos radioelementos eU, eTh e K em alta e igual proporção. A radiofácies *B2* possui baixos teores de equivalente Urânio e Potássio, enquanto os valores de equivalente Tório são altos em toda sua extensão.

No leste da radiofácies *B1* há uma porção de cor em tons amarelos, concentrações intermediárias entre eTh e K, que coincide com o granitóide Diogo de Vasconcelos apresentado no mapa da CPRM (2014), porém com menor extensão (Figura 4.10 e Figura 4.11), sugerindo então que este litotipo pode não ter as dimensões que foram cartografadas para este mapa. Faz-se necessário averiguação em campo para determinar os reais limites deste corpo granítico.

Ainda na radiofácies *B1*, é interessante ressaltar o horizonte com alto teor de eU, com coloração azulada se destacando na porção norte desta radiofácies (Figura 4.11), coincidindo com as rochas do complexo Mantiqueira.

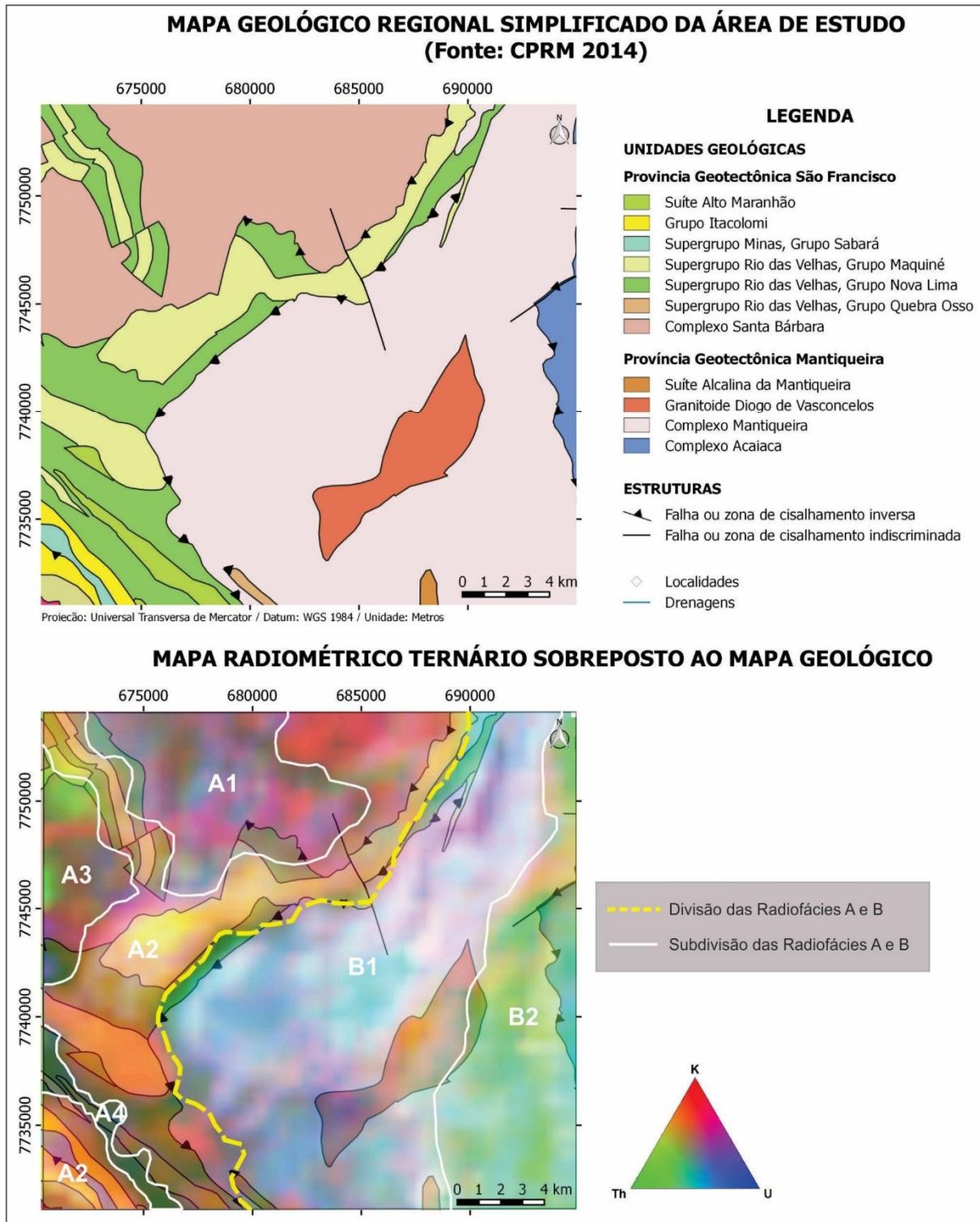


Figura 4.11- Acima, mapa geológico simplificado da área de estudo (Modificado da CPRM 2014), e abaixo, a sobreposição do mapa radiométrico ternário ao mapa geológico. No mapa ternário há a divisão de radiofácies A, B e suas subdivisões.

4.5 GEOLOGIA ECONÔMICA

Na área de estudo, que possui aproximadamente 625 m², existem 141 processos abertos para 10 substâncias diferentes (DNPM 2017), dentre elas destacam-se em maior quantidade minério de ouro, minério de ferro e esteatito (Figura 4.12).

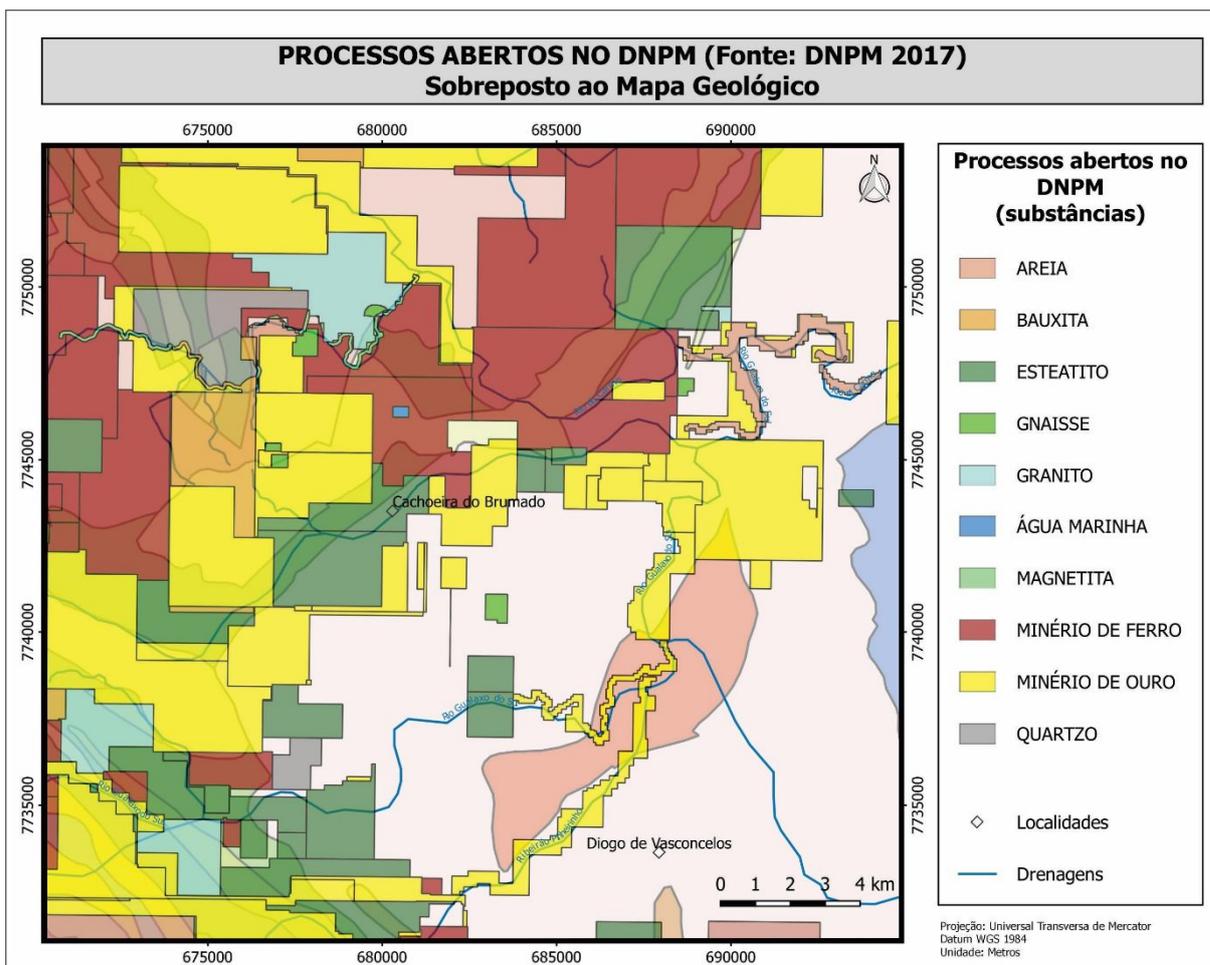


Figura 4.12- Processos abertos no Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) e respectivas substâncias de interesse, sobreposto ao mapa geológico da área. (Modificado de CPRM 2014, DNPM 2017).

Segundo o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) existem diversos registros de ocorrências minerais na área de estudo, com destaque para a ocorrência de ouro observada no mapa da Figura 4.13, é interessante resaltar que as ocorrências deste mineral estão quase em sua totalidade no domínio da Província Geotectônica São Francisco associadas ao *greenstone belt* Rio das Velhas. No domínio da PGM parte dos processos minerários (Figura 4.12) e registros de ocorrência de ouro (Figura 4.13) estão associados às

Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..

drenagens, evidenciando exploração aluvionar. Estes dados mostram que as mineralizações são concentradas na PGSF a partir do descolamento da PGM, onde não apresenta ocorrências primária.

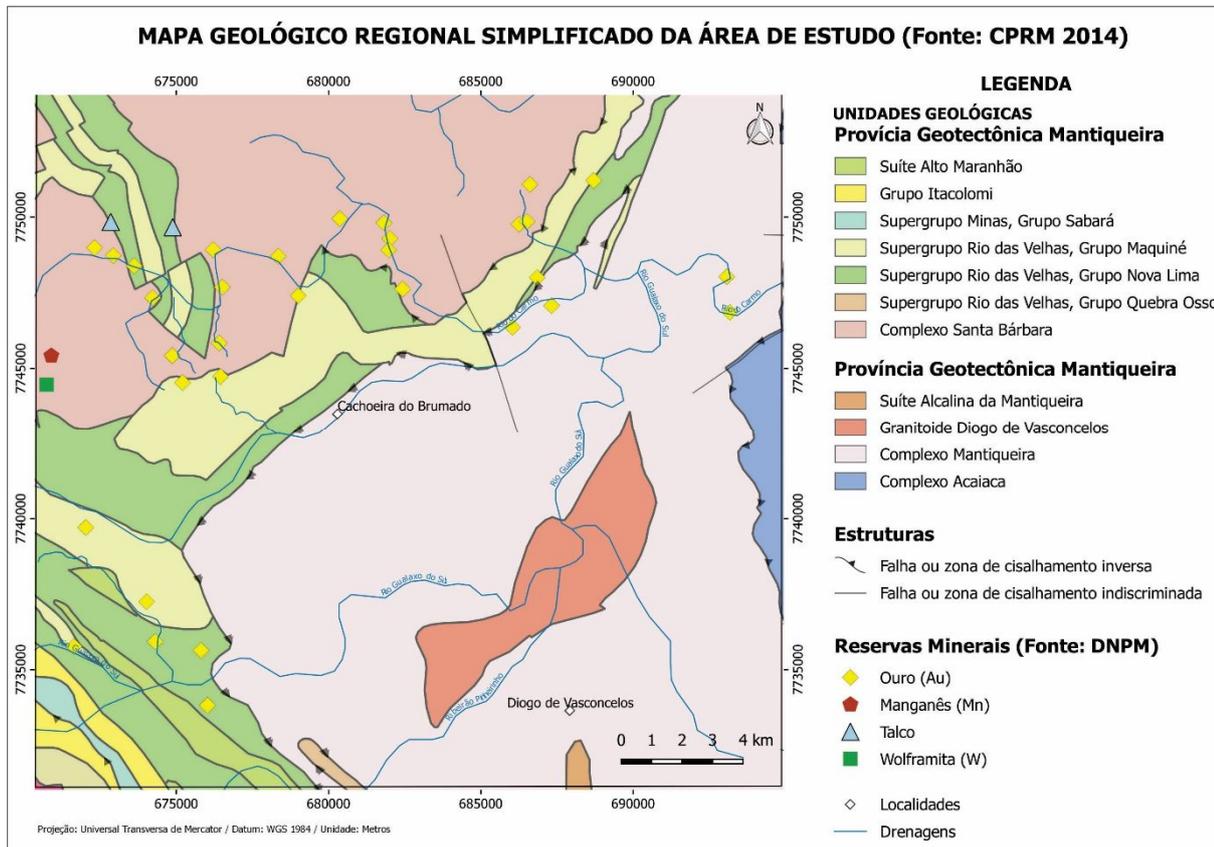


Figura 4.13- Mapa geológico simplificado da área estudada com indicação dos recursos minerais existentes segundo dados do DNPM. (Modificado de CPRM 2014, DNPM 2010).

Fazendo uma análise entre os mapas temáticos do parâmetro F e o canal de Potássio (Figura 4.14 e Figura 4.15), é possível correlacionar as ocorrências minérias aos importantes lineamentos observados na área.

O parâmetro F ressalta o enriquecimento de potássio e equivalente Urânio em relação ao Tório, podendo indicar áreas com alteração hidrotermal associadas com mineralizações ou áreas favoráveis à prospecção mineral (Ribeiro *et al.* 2013). Os valores mais altos são encontrados no domínio do complexo Mantiqueira, porção nordeste, além de pontos isolados, dentre os quais, no extremo oeste do mapa, pode ser observado uma pequena anomalia onde é registrada a ocorrência de Wolframita. Esta ocorrência está associada com o contato entre o complexo Santa Barbara e o Supergrupo Rio das Velhas. A Wolframita é um mineral que

ocorre frequentemente associado a veios hidrotermais normalmente ligados a corpos graníticos.

Destaca-se, ainda no mapa do parâmetro F, os lineamentos na porção sudoeste com direção noroeste-sudeste, onde podem ser observado registros de mineralizações de ouro que seguem um padrão de mesma direção. Na área destas ocorrências há processos minerários para a mesma substância (Figura 4.12).

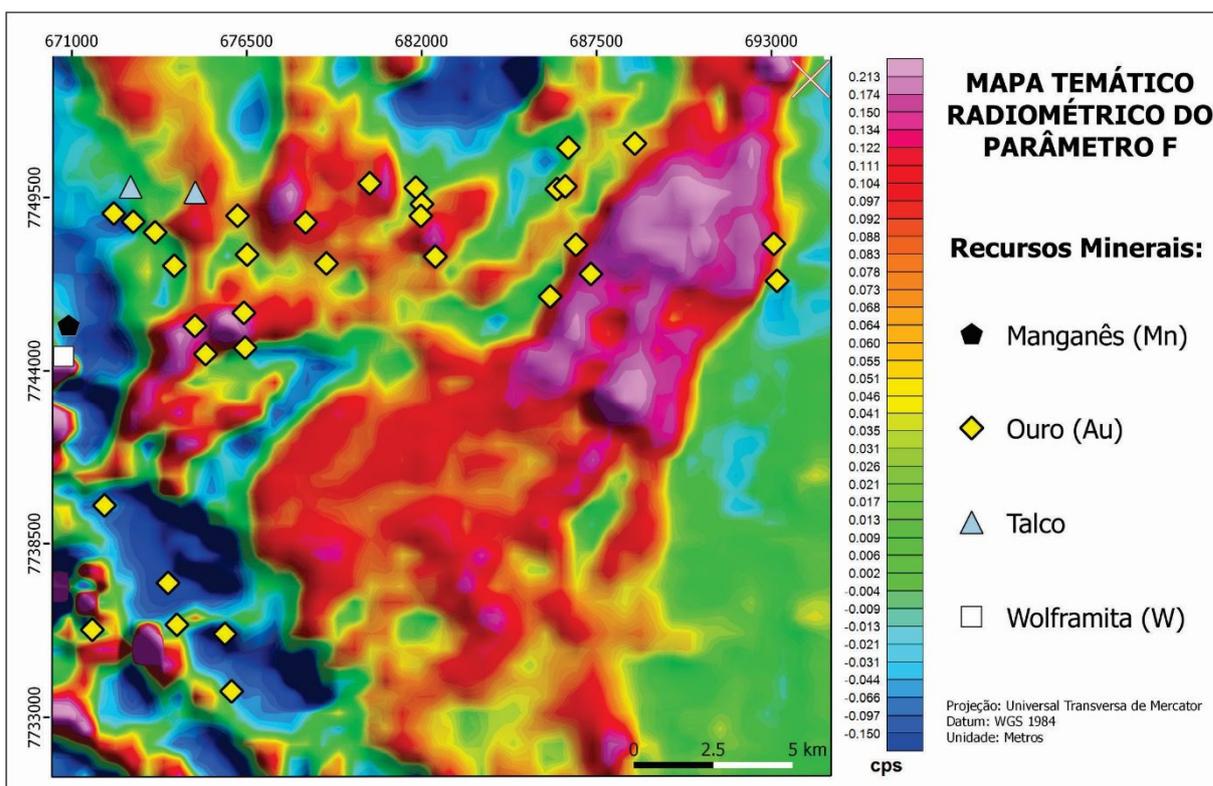


Figura 4.14- Mapa temático parâmetro F com indicação das mineralizações de Manganês, Ouro, Talco, Wolframita (DNPM 2017).

A associação das mineralizações de ouro com os lineamentos ficaram bem evidenciados no mapa temático do canal de Potássio (Figura 4.15). Da porção noroeste até nordeste do mapa há lineamentos que coincidem com as ocorrências de ouro (DNPM 2017), além da parte sudoeste que também possui lineamentos e registro de mineralização. Nitidamente, a grande parte das localizações de ocorrências minerais estão posicionadas nos limites das anomalias, e não centradas nas mesmas.

Há registros de mineralizações de Talco, na porção noroeste do mapa, associados aos xistos do Grupo Nova Lima, que no mapa do canal de Potássio, aparecem em um sutil lineamento leste-oeste na interface de valores altos e intermediários. Há, ainda, uma ocorrência de Manganês observada na parte oeste do mapa, onde encontram-se rochas do complexo Santa Bárbara.

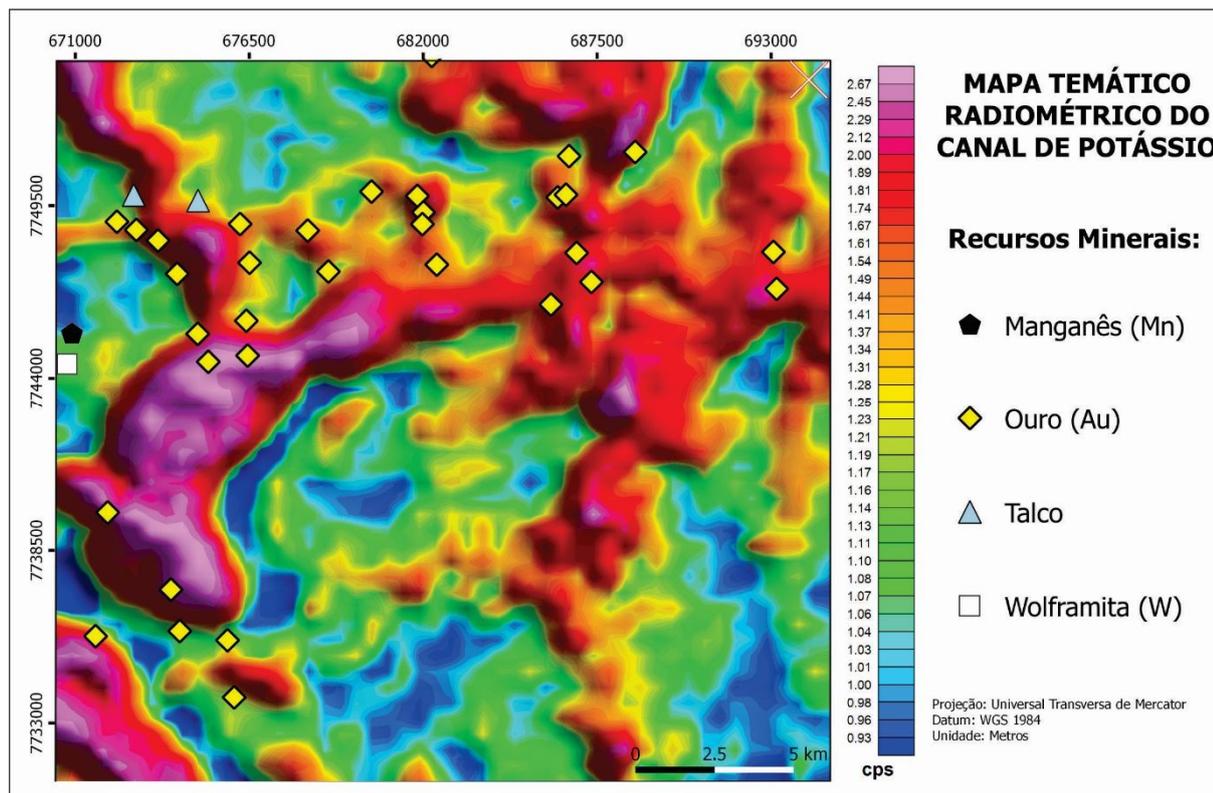


Figura 4.15- Mapa temático do canal de Potássio com indicação das mineralizações de Manganês, Ouro, Talco e Wolframita (DNPM 2017).

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como finalidade apresentar as estimativas de profundidades médias dos topos das fontes causadoras de anomalias magnéticas, a partir da Deconvolução de Euler, que consiste em uma sistemática aplicada aos dados geofísicos através de homogeneização de funções matemáticas em coordenadas cartesianas.

5.2 METODOLOGIA APLICADA

Foram criadas 24 linhas com direção norte-sul e 22 com direção leste-oeste no *software QGis 2.12.2*, a fim de gerar os perfis de inversão de dados e observar qual destas direções gerariam melhores respostas, dada a compartimentação da área em dois domínios geotectônicos. As linhas são equiespaçadas em 1 km e tiveram aproximadamente 23 km de extensão.

A *shape* de linhas previamente criada serviu de base para a geração dos perfis de *grid* no *software Oasis Montaj 7.0.1 (Geosoft)*, de dados de amplitude de sinal analítico (ASA). A Figura 5.1 mostra todos os perfis gerados, com destaque para o perfil sete (P7) e perfil treze (P13) de direção norte-sul e perfis oito (P8) e dezessete (P17) de direção leste-oeste, que foram usados para análise das estruturas em profundidades estimadas.

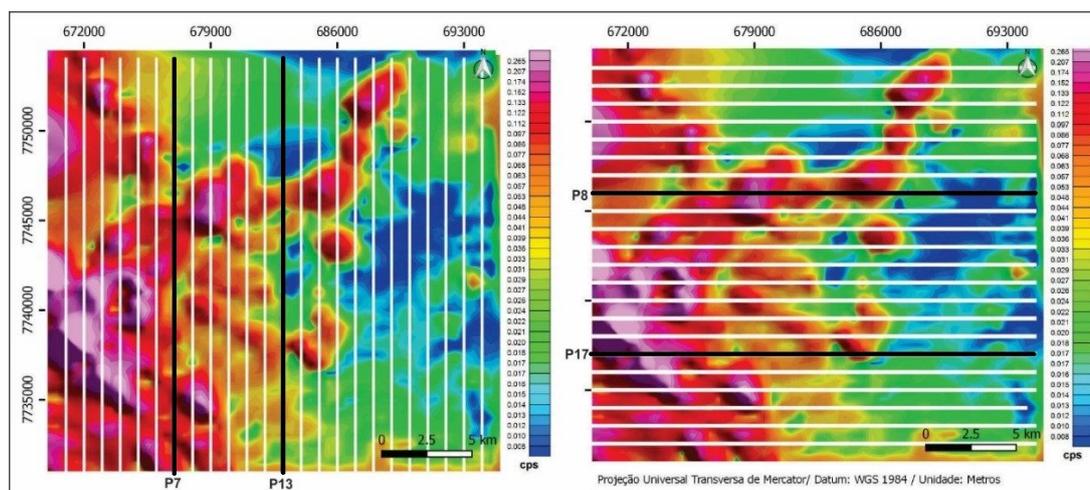


Figura 5.1- Distribuição dos perfis gerados no *software Oasis Montaj 7.0.1*, com destaque para aqueles que foram analisados por meio da deconvolução de Euler.

No *Geosoft*, foi criado um banco de dados com as informações geradas pelos perfis magnetométricos, que posteriormente foram exportadas como um arquivo no formato *.csv* contendo as posições e respectivos dados de amplitude de sinal analítico. Este arquivo foi preparado e transformado no formato *.dia* para então ser processado no *software* livre *Euler 1.0* da *School of Geosciences – University of the Witwatersrand* (Durrheim & Cooper 1998).

No *software Euler 1.0* foi feito o *input* dos dados magnetométricos e da altura de vôo, que no caso da Área 2 foi de 100 m. Para a inversão magnetométrica foi necessária a entrada dos seguintes parâmetros: tamanho da janela e índice estrutural, que neste caso foram utilizados o índice estrutural igual a um e o tamanho da janela com valores variando entre sete, nove e onze, de acordo as melhores respostas de cada um dos perfis. Esta variação no tamanho da janela fez-se necessário devido a heterogeneidade na geologia da área que é polideformada e não segue um determinado padrão para que fosse admitido um mesmo parâmetro.

A deconvolução do perfil sete (P7), de direção norte-sul, é mostrada na Figura 5.2. O topo médio das fontes das anomalias magnéticas atinge cerca de 5500 m de profundidade na porção norte do perfil, e na parte central a sul existem algumas anomalias com profundidade menores que 1500 m. Estas altas profundidades ocorrem no domínio do complexo Santa Bárbara e podem ser sugeridas como zona de cisalhamento ou estrutura de descolamento abaixo do embasamento. Uma possível interpretação destas anomalias segue na Figura 5.2.

A deconvolução do perfil treze (P13), de direção norte-sul, é mostrada na Figura 5.3. A profundidade média de topo das fontes das anomalias magnéticas atinge até cerca de 7000 m de profundidade na porção norte do perfil, e na parte sul existem anomalias de contato chegando a cerca de 2800 m de profundidade. Na interpretação das anomalias magnéticas do P13, Figura 5.3, foi identificado uma estrutura profunda na parte norte do perfil, além de possíveis falhas na porção centro sul. Como no P7, estas altas profundidades ocorrem no domínio do complexo Santa Bárbara e podem ser sugeridas como zona de cisalhamento ou estrutura de descolamento no contato do embasamento com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas. As anomalias de contato na porção centro sul ocorrem no domínio do complexo Mantiqueira e podem ser interpretas como de falhas ou zonas de cisalhamento que podem estar associadas a diferentes litologias.

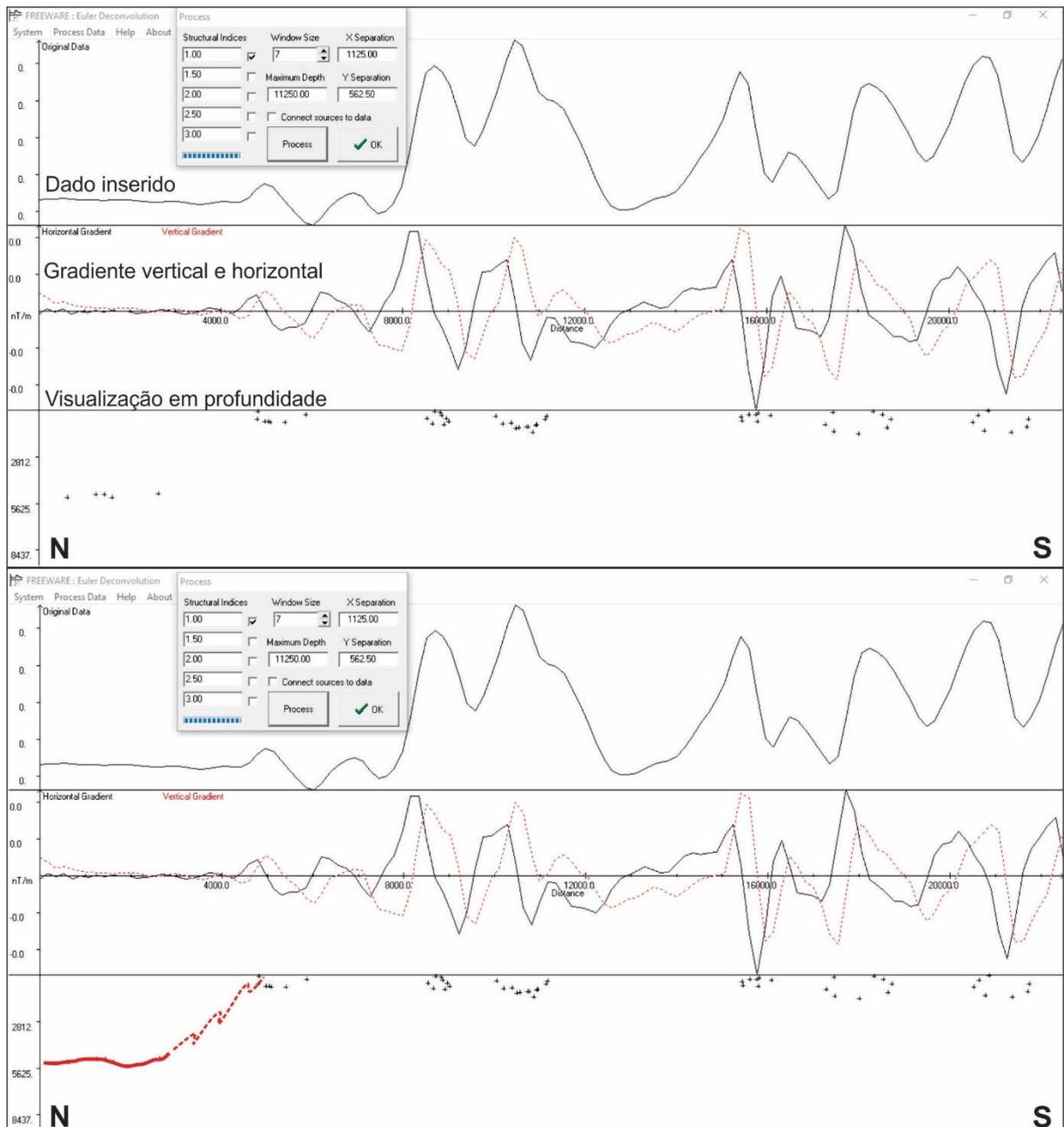


Figura 5.2- Resultado da deconvolução de Euler no perfil sete (P7) de direção norte-sul. Foi utilizado janela de tamanho 7. Na imagem inferior, em vermelho, a interpretação do resultado obtido com a deconvolução.

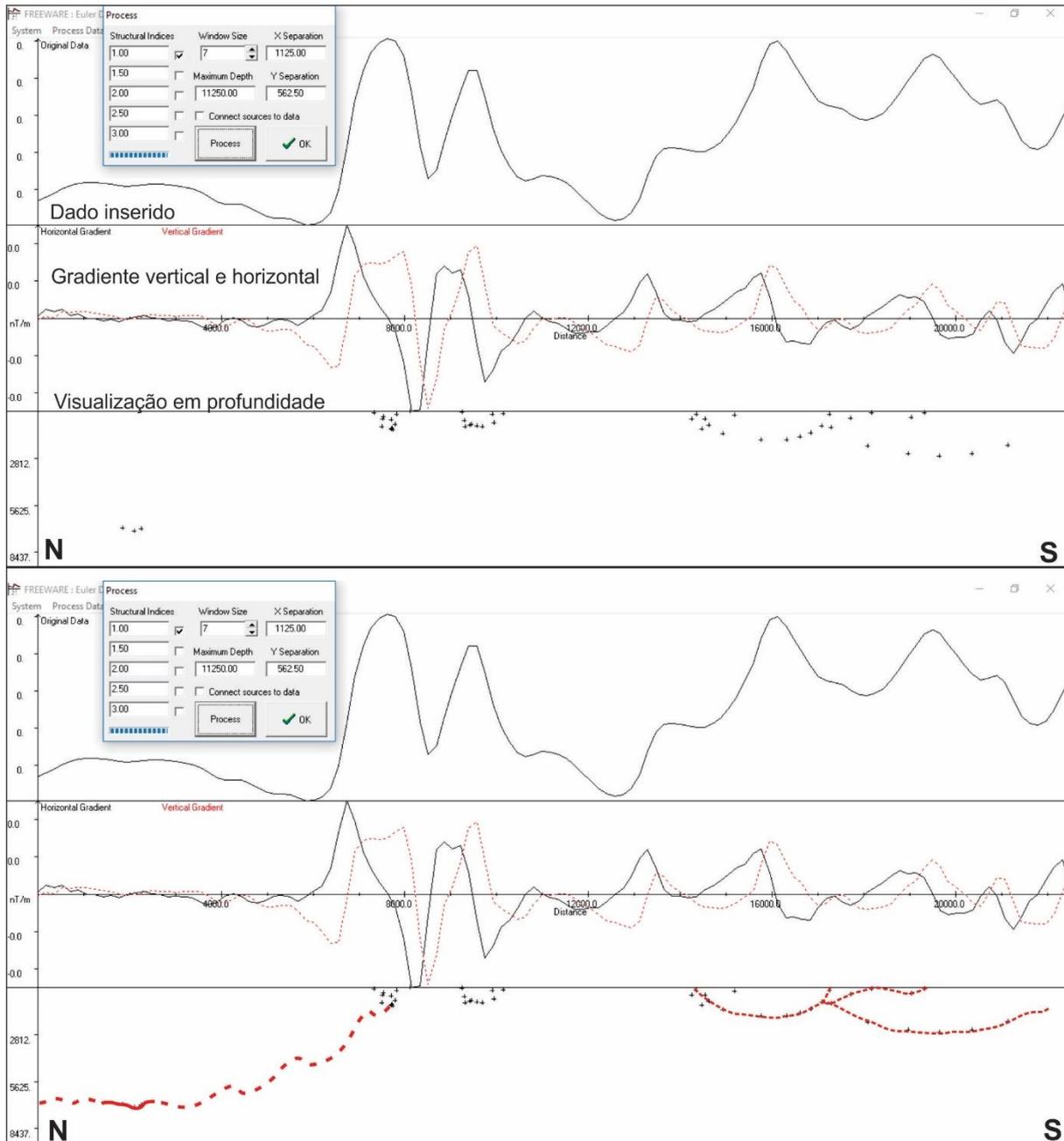


Figura 5.3- Resultado da deconvolução de Euler no perfil treze (P13) de direção norte-sul. Foi utilizado janela de tamanho 7. Na imagem inferior, em vermelho, a interpretação do resultado obtido com a deconvolução.

A deconvolução do perfil oito (P8), de direção leste-oeste, é mostrada na Figura 5.4. A profundidade média de topo das fontes das anomalias magnéticas são de cerca de 5500 m de profundidade na porção leste do perfil. Na interpretação das anomalias magnéticas deste perfil, foi identificado uma estrutura profunda na parte leste do perfil, além de possíveis estruturas de contato cisalhadas ou falhas na porção central.

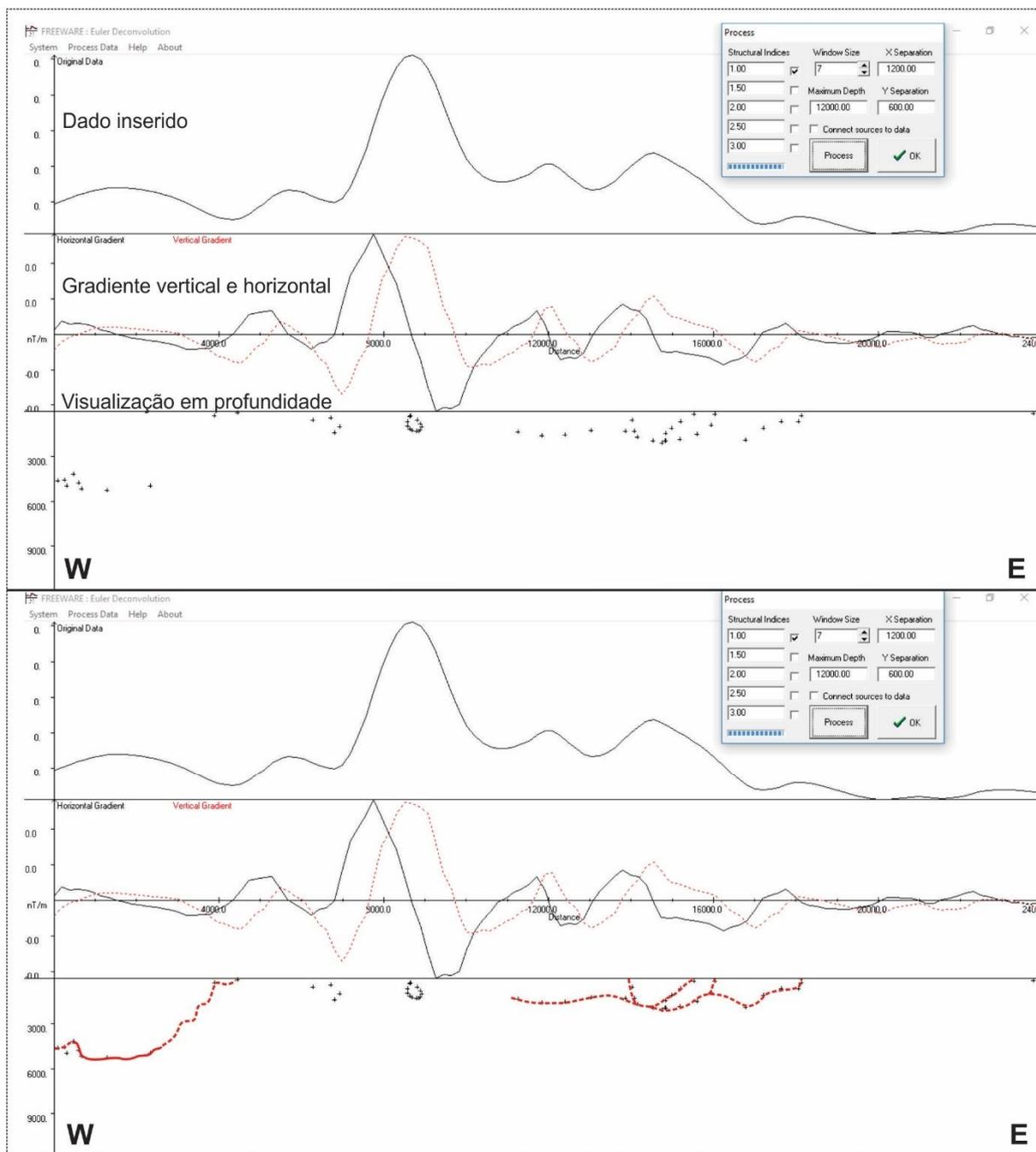


Figura 5.4- Resultado da deconvolução de Euler no perfil treze (P8) de direção leste-oeste. Foi utilizado janela de tamanho 7. Na imagem inferior, em vermelho, a interpretação do resultado obtido com a deconvolução.

A deconvolução do perfil dezessete (P17), de direção leste-oeste, é mostrada na Figura 5.5. A profundidade média de topo das fontes que geram anomalias magnéticas atinge até cerca de 3800 m de profundidade na porção oeste do perfil. A interpretação das anomalias no perfil P17 mostra uma estrutura em profundidade que emerge no limite entre a Província Geotectônica São Francisco (Supergrupo Rio das Velhas) e da Província Geotectônica

Mantiqueira (unidades do Complexo Mantiqueira), coincidente com um lineamento de direção noroeste-sudeste onde existem registros de diversas mineralizações auríferas (Figura 4.8 e Figura 4.10). Devido suas características e comparação com o mapa geológico existente, esta estrutura foi interpretada como uma falha reversa, que está associada ao *front* de empurrão da primeira fase do orógeno Brasileiro, que registra vergência tectônica para oeste (Endo 1997). Ainda foi caracterizado uma possível estrutura dobrada na parte central do perfil no domínio das rochas do complexo Mantiqueira.

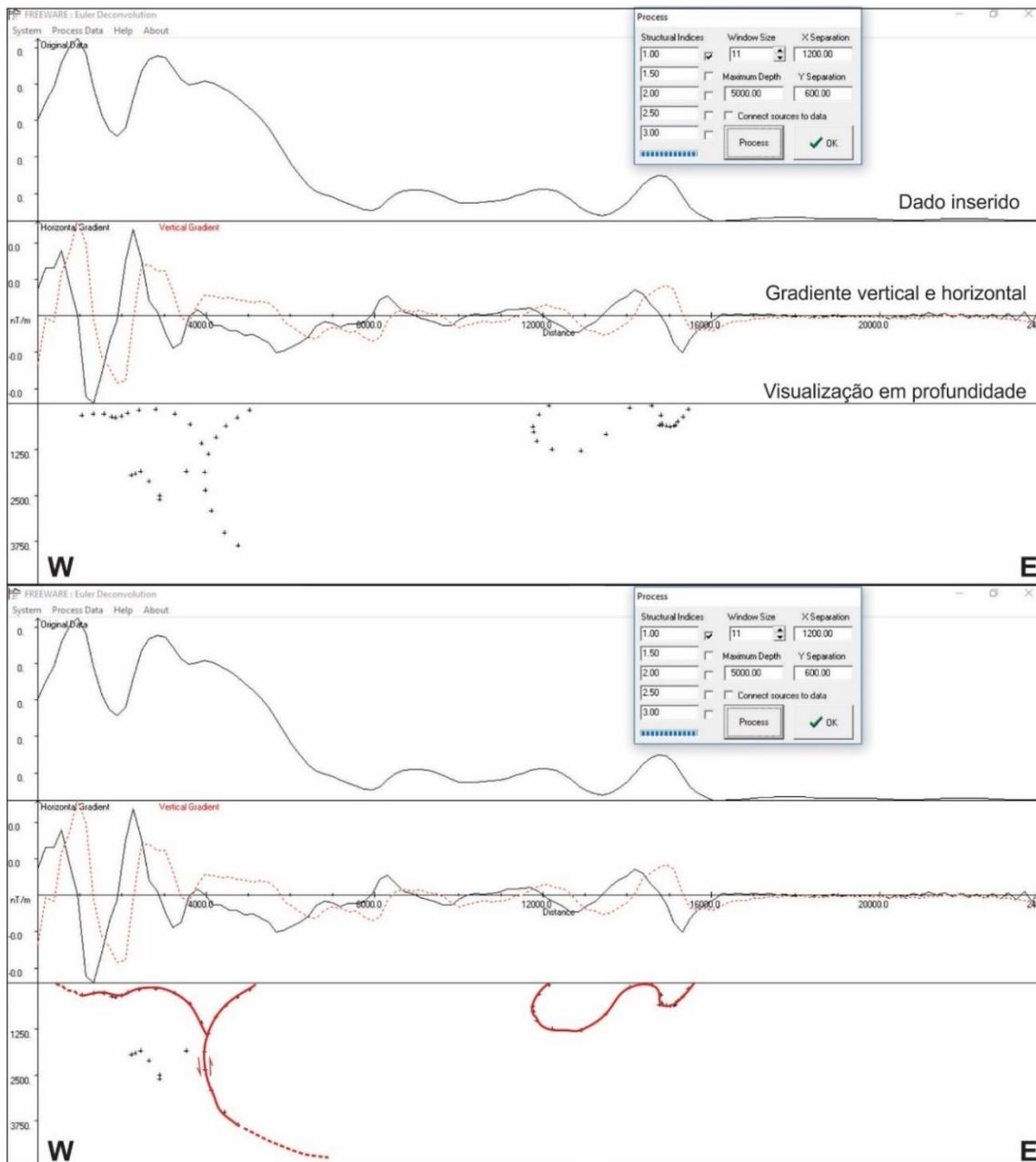


Figura 5.5- Resultado da deconvolução de Euler no perfil dezessete (P17) de direção leste-oeste. Foi utilizado janela de tamanho 11. Na imagem inferior, em vermelho, a interpretação do resultado obtido com a deconvolução.

Todos os perfis mostrados apresentam anomalias de alta susceptibilidade magnética, sendo que as profundidades média de topo dos corpos magnéticos causadores destas anomalias possuem diferentes profundidades, com destaque para os perfis P7 e P13, de direção norte-sul, que chegam a até 7000 metros na porção mais a norte, coincidente com o domínio do complexo Santa Bárbara. Outro ponto a ser destacado é o contato entre as PGSF e PGM mostrado no perfil P17.

5.3 VISUALIZAÇÃO EM 3D

No *software ArcGis 9.3*, primeiramente, foi feita a interpolação dos dados leste-oeste e norte-sul em separado para comparação das respostas. Posteriormente foi feito a interpolação de todos os perfis representados na Figura 5.1, tanto os perfis norte-sul quanto os perfis leste-oeste, gerando uma única interpolação de dados para toda a área, que mostrou o detalhamento e suavização das estruturas. Este processo foi feito através da metodologia *krigagem*, que consiste em um método geoestatístico para estimar um valor desconhecido a um ponto, área ou volume com base nos dados disponíveis no entorno daquele desconhecido. De posse dos dados interpolados gerou-se o modelo 3D através do *software ArcScene 9.3*, que representa a topografia média em profundidade das fontes de anomalias magnéticas (Figura 5.6).

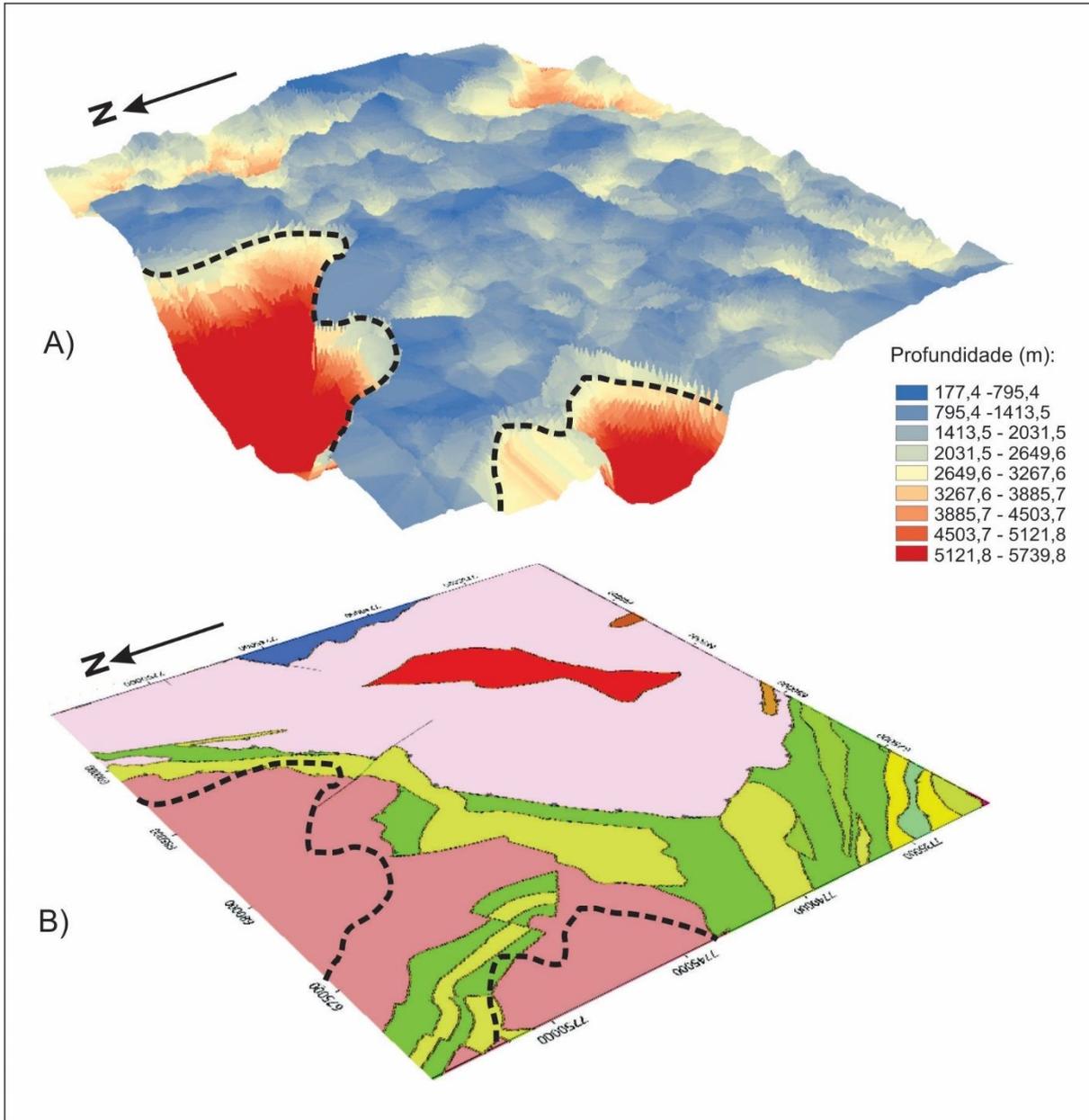


Figura 5.6- Visualização 3D da área estudada, a partir do método de inversão magnetométrica (Deconvolução de Euler). Visão superior do modelo 3D, o mesmo com interpretação da estrutura em profundidade e mapa geológico da indicação da localização da estrutura.

5.5 DISCURSÃO E RESULTADOS

A análise do modelo 3D obtido permitiu evidenciar os domínios com diferentes profundidades médias de topo das fontes anômalas.

Na Figura 5.6, a anomalia mais profunda observada localiza-se na parte norte do mapa, coincidente com o domínio do complexo Santa Barbara. Os limites desta estrutura coincidem com o contato entre o embasamento e as rochas do Supergrupo Rio das Velhas.

Este resultado evidencia a existência de uma zona de cisalhamento ou estrutura de descolamento no topo do embasamento. A interpretação, levando em conta o traço dobrado deste contato e o modelo de evolução de nappes do QFe (Endo *et al.* 2005, Madeira *et al.* 2017), induz a sugestão do envolvimento do embasamento nucleando uma dobra. Os limites do embasamento com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas apresentam geometria em forma de “M”, representando uma megadobra com vergência para sul. Esta estrutura foi definida como nappe Furquin, o prolongamento do seu flanco normal para norte foi definido por Bernardes (2016).

A outra estrutura que apresenta grandes profundidades é o domínio correspondente ao anticlinal de Mariana, na borda oeste do mapa (Figura 5.6). Existe a possibilidade que a estrutura causadora desta anomalia magnética seja decorrente da zona de cisalhamento Água Quente (ZCAQ), que bordeja a anticlinal de Mariana (Figura 2.3), e que pode estar dobrada pela nucleação do anticlinal e, portanto, segue sua geometria. A ZCAQ consiste um sistema de falhas de direção norte-sul, que se estende desde o município de Mariana até Santa Bárbara, passando por Camargos, Bento Rodrigues, Santa Rita Durão, Morro da Água Quente e Catas Altas. O sistema é composto por inúmeras falhas de empurrão, relacionadas a uma tectônica contracional de forte expressão, que ocorrem na borda leste do Quadrilátero Ferrífero (Ferreira Filho *et al.* 1999). Uma segunda possibilidade é que o domínio correspondente a esta alta profundidade seja representado pelas rochas do Grupo Nova Lima e esta resposta de susceptibilidade magnética representa o limite litológico deste grupo com embasamento. A Falha Bento Rodrigues, pertencente a ZCAQ (Rossi & Endo 2015), fica entre esta estrutura e o Complexo Santa Bárbara, à norte (Figura 4.5, da imagem SRTM, e Figura 4,6, mapa de amplitude do sinal analítico), tangencia o contato entre o Grupo Nova Lima e este complexo.

Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..

6.1 INTRODUÇÃO

A fim de se averiguarem anomalias determinadas pelos perfis de deconvolução e mapas geofísicos, realizou-se uma campanha de campo onde foram levantadas duas seções geotransversais para geração de dois perfis geológicos, visando obter as relações de contato entre as rochas do embasamento e as supracrustais, assim como caracterizar o arcabouço estrutural e a polaridade dos eventos tectônicos.

6.2 DESCRIÇÃO DAS SEÇÕES GEOTRANSVERSAIS

As seções são perfis geológicos levantados na área de estudos, sendo A-A' de direção oeste-leste e B-B' de direção norte-sul (Figura 6.1).

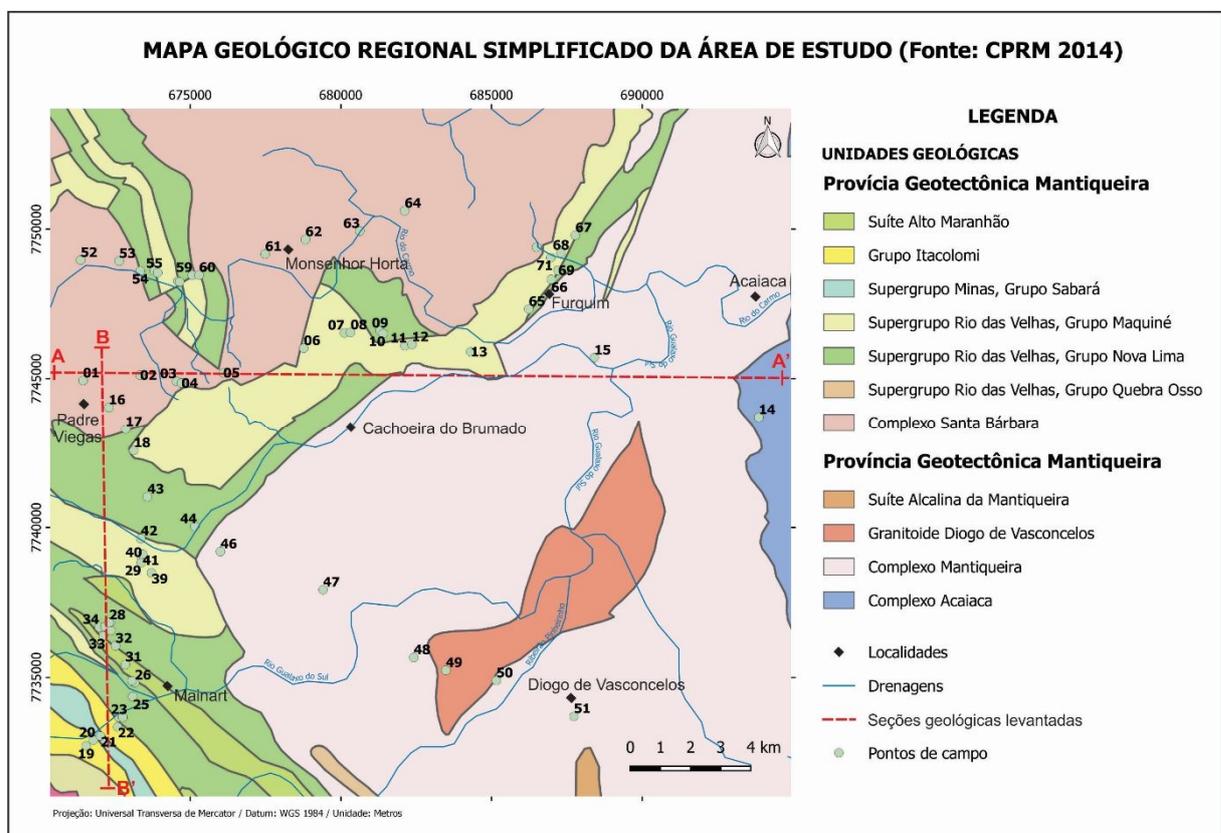


Figura 6.1- Mapa geológico simplificado da área de estudo com os pontos onde foram feitas as observações em campo e a articulação das seções geológicas levantadas (adaptado de CPRM 2014).

6.2.1 Seção A-A'

A seção A-A', de direção oeste-leste e cerca de 25 km de extensão, ocupa a porção central da área e foi levantada nas proximidades da MG-262, entre os distritos de Padre Viegas e Acaiaca (Figura 6.1). Devido a complexidade geológica e para facilitar a caracterização litológica e estrutural o perfil foi dividido em domínio *A*, *B* e *C* (Figura 6.2).

Domínio A

Na porção oeste deste perfil, domínio *A*, afloram gnaisses pertencentes ao Complexo Santa Bárbara. A rocha apresenta coloração cinza escuro com bandas esbranquiçadas e quando alterada, como observado na maior parte da área, possui tons rosáceos a marrons. Além do bandamento composicional, é marcante a presença de uma foliação penetrativa S_n a qual pode ser classificada como uma xistosidade plano-axial associada ao processo de dobramento das rochas da região (Figura 6.3).

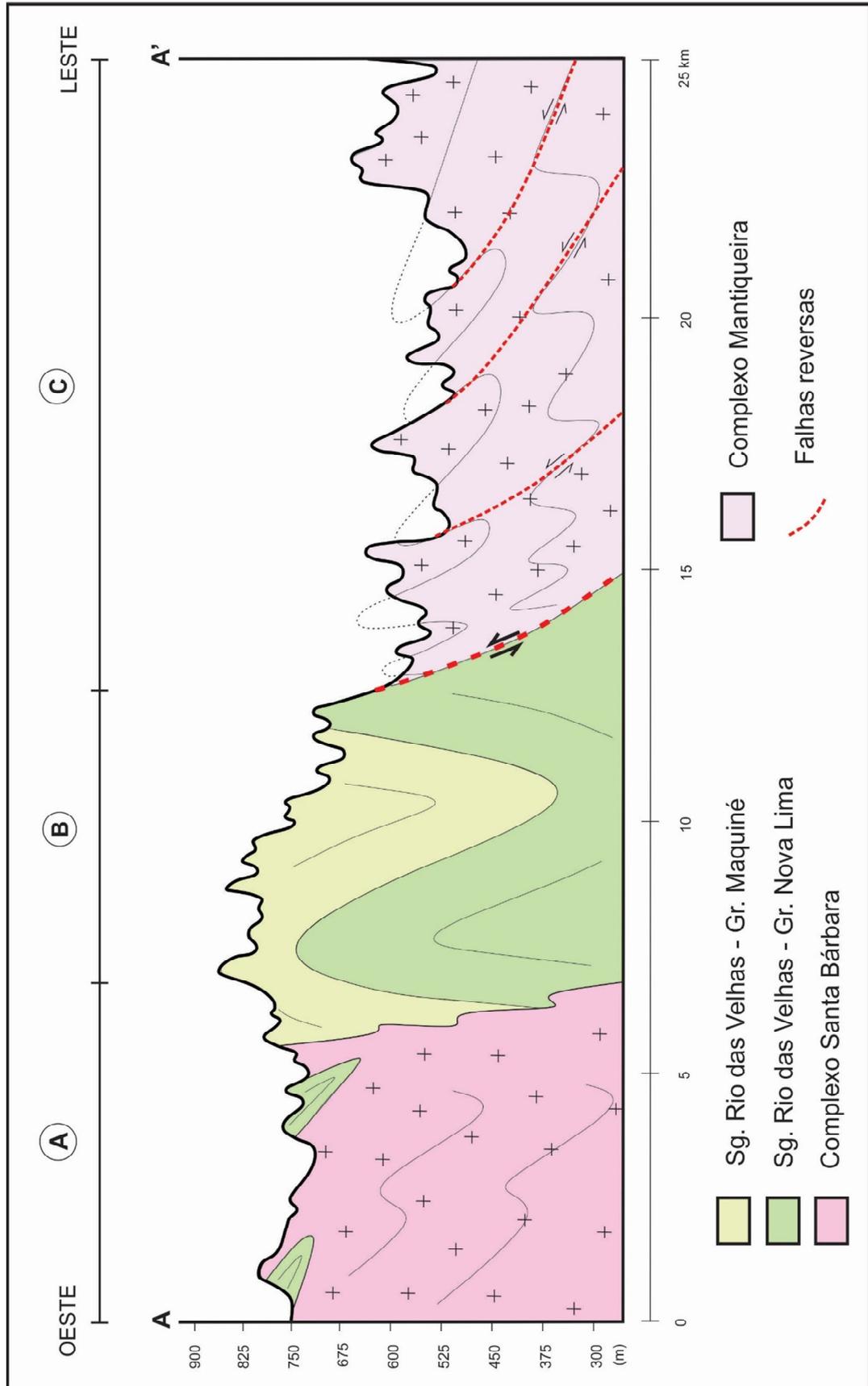


Figura 6.2- Seção geológica vertical A-A', com direção oeste-leste. Acima são apresentados os domínios A, B e C, respectivamente.



Figura 6.3- Fotografia grafia do gnaiss do Complexo Santa Bárbara, com visada para sudeste. (A): bandamento composicional verticalizado, em amarelo, e foliação S_n em vermelho. (B): detalhe do bandamento verticalizado. (Fotografia grafia: Thiago Madeira).

De forma intercala às rochas gnáissicas do Complexo Santa Bárbara, foram observados corpos de xistos marrons-avermelhados pertencentes ao Grupo Nova Lima, com micas brancas alongadas determinando muito bem os planos da xistosidade e a variação composicional marcando o acamamento.

Nos estereogramas do domínio *A*, onde foram compilados os dados dos pontos 1 ao 5 e 16 e 17, a atitude máxima dos planos da xistosidade é 103/83 e do bandamento composicional é 291/83 apresentando alto ângulo. Os planos produzem uma lineação de interseção, observada nas rochas do embasamento e do Grupo Nova Lima que possui orientação máxima 120/84 (Figura 6.4)

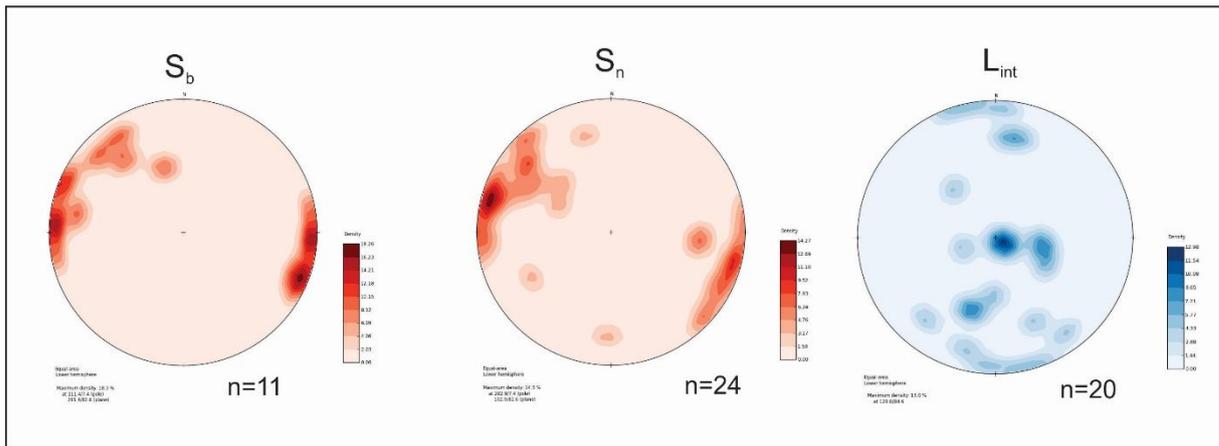


Figura 6.4- Estereogramas dos polos do acamamento (S_b), foliação (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio A.

Domínio B

No domínio B, na porção central da seção (Figura 6.2), entre os pontos 6 e 12 (Figura 6.1), afloram sericita-quartzo xistos de coloração bege-esbranquiçados associados como do Grupo Maquiné.

O acamamento sedimentar, de forma geral, mergulha para sul-sudeste com baixo ângulo. A foliação S_n tem a direção do mergulho variando de oeste até sudeste, com mergulhos também variando de baixo a alto ângulo, evidenciado um dobramento regional com plano axial mergulhando para oeste, como representado na seção geológica da Figura 5.8 e nos estereogramas da Figura 6.5. Em escala de afloramento é possível observar mesodobras com padrão “S” e eixo com caimento 210/15 (Figura 6.6)

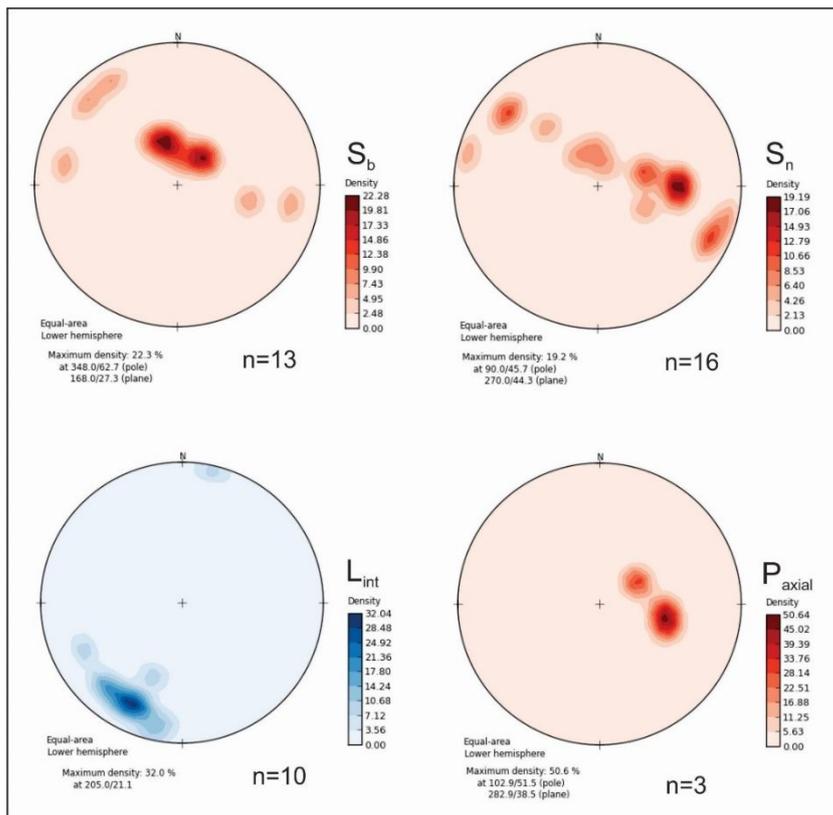


Figura 6.5- Estereogramas dos polos do acamamento (S_b), xistosidade (S_n), lineação de interseção (L_{int}) e plano axial de dobras (P_{axial}), respectivamente, no domínio C.



Figura 6.6- Mesodobras com padrão "S" (anti-horário), eixo com caimento 210/15. Ponto 12 no domínio B. (Fotografia: Mayko Elias Neves).

Domínio C

O domínio *C* é representado por gnaisses e granitoides da Província Geotectônica Mantiqueira (PGM), que encontram-se com alto grau de alteração devido à baixa resistência ao intemperismo. As rochas alteradas apresentam coloração vermelho-amarronzado com bandas esbranquiçadas, algumas porções possuem cores em tons acinzentados, dependendo do grau de alteração e da composição.

É marcante a presença de um bandamento composicional e de uma foliação S_n associada ao tectonismo condizente com o evento brasileiro, com transporte tectônico leste-oeste a sudeste-noroeste. Neste contexto foi possível observar, em escala de afloramento, dobramentos em veios de quartzo correspondente a uma estrutura fractal associada as megadobras da área (Figura 6.7). As relações estruturais observadas nos pontos 14 e 15 são apresentadas nos estereogramas da Figura 6.8.

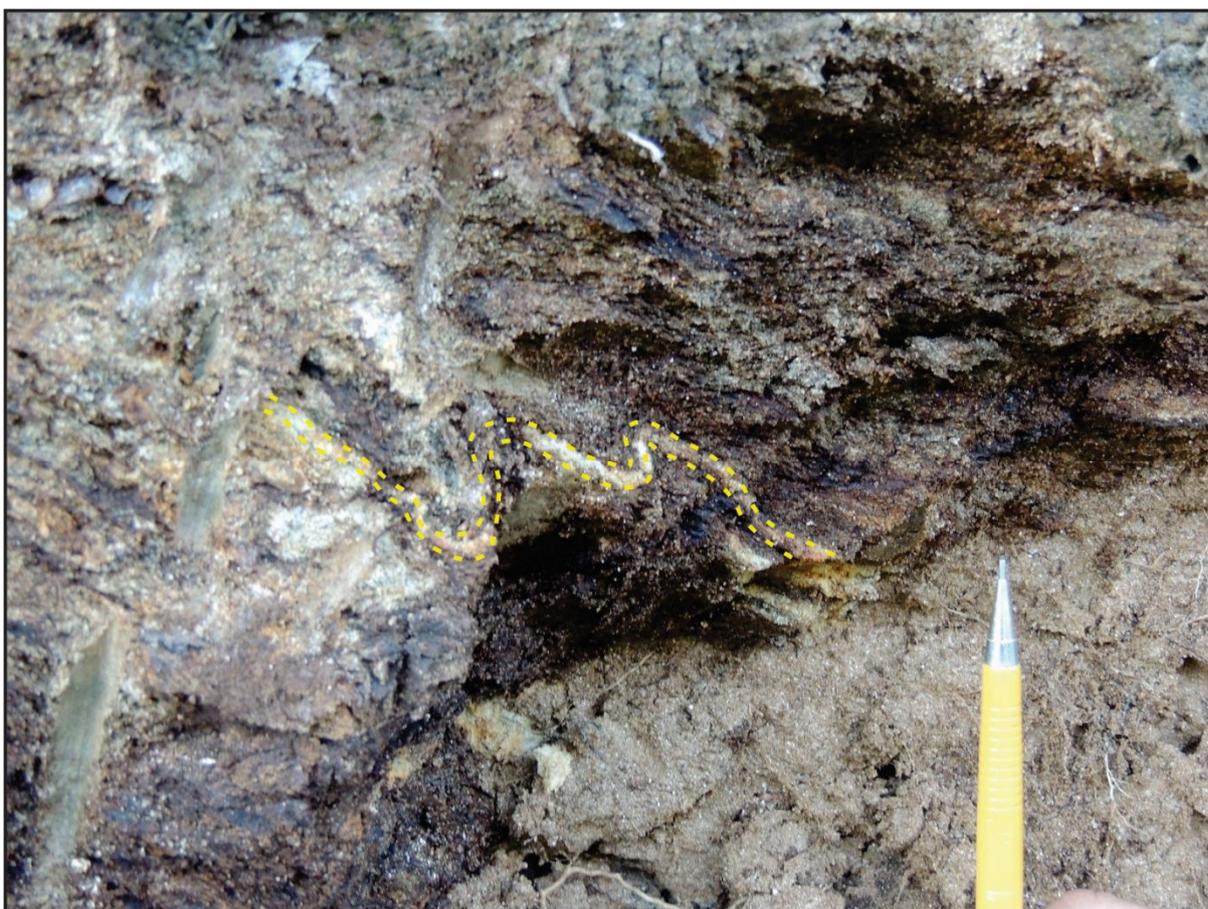


Figura 6.7- Dobramento em veio de quartzo representando uma estrutura fractal do dobramento predominante da área. Ponto 14 com visada para norte, no domínio *C*. (Fotografia: Thiago Madeira).

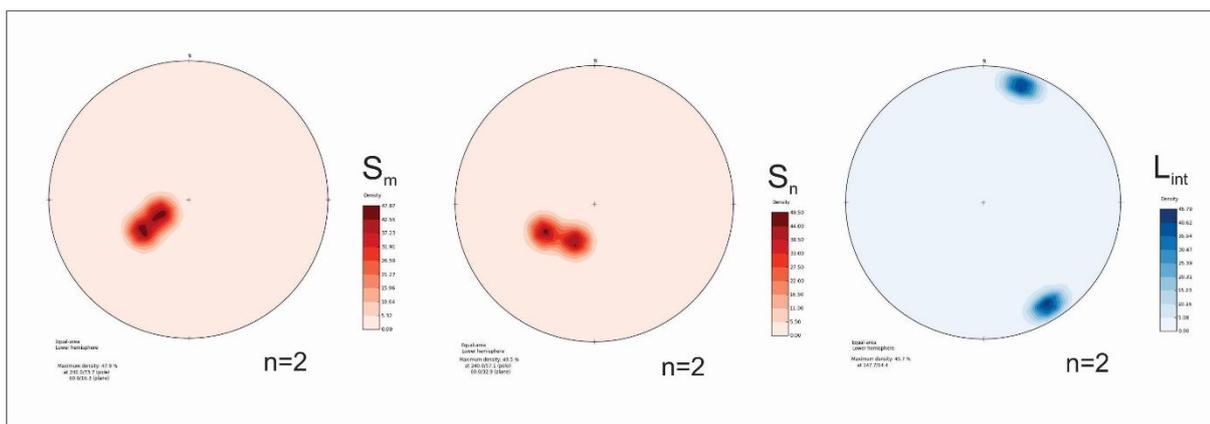


Figura 6.8- Estereogramas dos polos da foliação milonítica (S_m), xistosidade (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio C.

6.2.2 Seção B-B'

A seção B-B', com direção norte-sul e cerca de 15 km de extensão, ocupa a porção leste e sudeste da área e encontra-se integralmente inserida do domínio do QFe. Foi levantado entre o distrito de Padre Viegas, passando por Mainart até o extremo sudoeste da região estudada (Figura 6.1).

Domínio A

Assim como o perfil oeste-leste, o perfil norte-sul foi dividido em três domínios: A, D e E respectivamente (Figura 6.9). O domínio A deste perfil é coincidente com o domínio homônimo do perfil oeste-leste, discutido anteriormente.

No ponto 16, domínio A, o contato entre as unidades do embasamento e do Grupo Nova Lima possui alto ângulo, assim como a xistosidade penetrativa S_n , e o bandamento composicional observado (Figura 6.10). Estas relações estruturais podem ser observadas no estereograma da Figura 6.4.

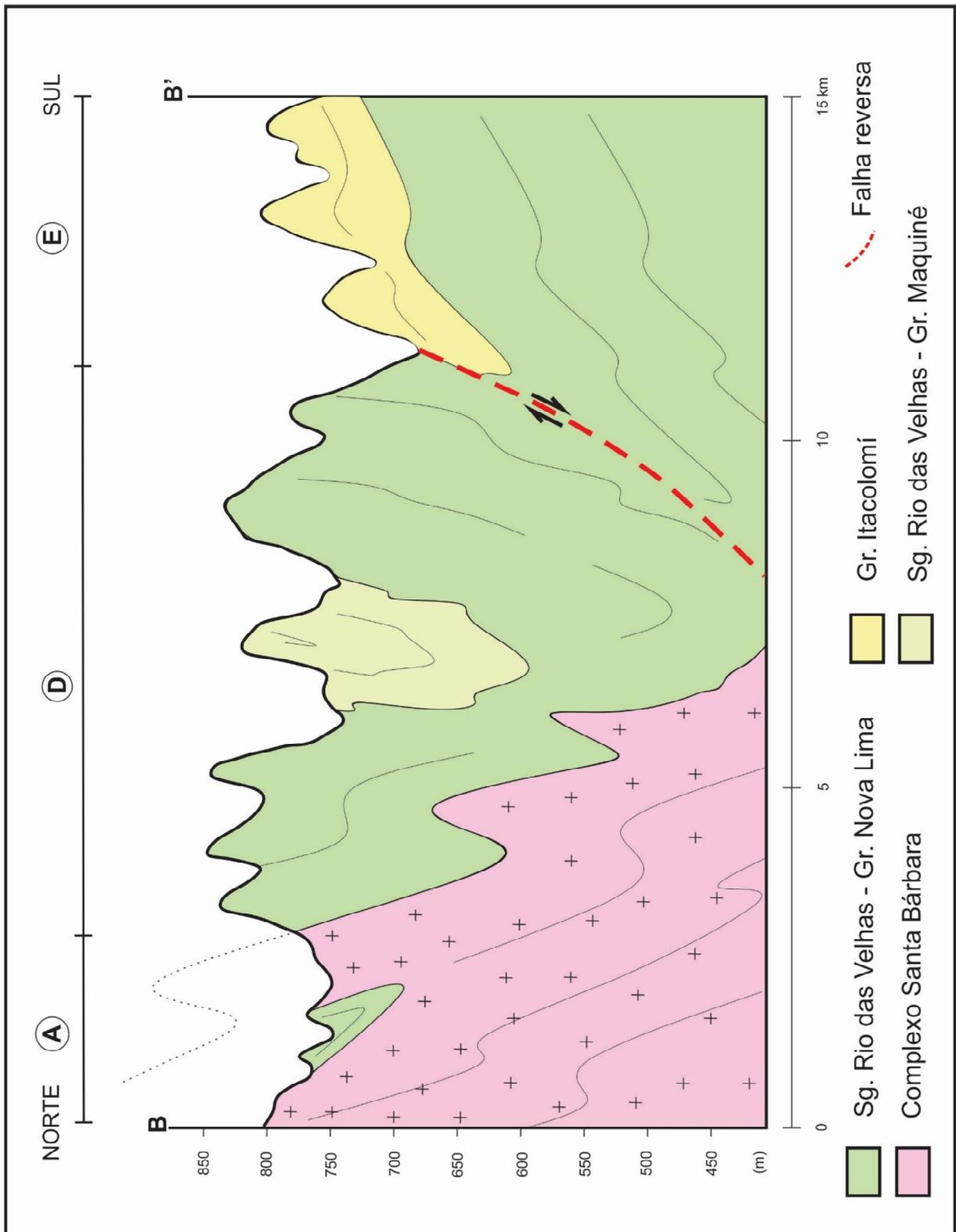


Figura 6.9- Seção geológica vertical B-B' de direção norte-sul. Acima são apresentados os domínios C, D e E, respectivamente.



Figura 6.10- Contato entre as rochas do embasamento Complexo Santa Bárbara, à esquerda, e xistos do Grupo Nova Lima, à direita. Visada para sudoeste no ponto 16, domínio *A*. (Fotografia: Thiago Madeira)

Domínio D

O domínio *D* ocorre na porção leste a sudoeste da área de estudos, pontos 26 a 43, onde afloram xistos e formação ferrífera bandada do Grupo Nova Lima e xistos e metarenitos do Grupo Maquiné. De forma geral as rochas desta porção apresentam *trend* estrutural sudeste-noroeste. Seu contato com o embasamento, composto pelas rochas do Complexo Santa Bárbara, ocorre de forma verticalizado (Figura 6.10).

O acamamento sedimentar S_b constitui uma estrutura sedimentar marcante nos metarenitos e xistos, sendo caracterizado pela variação granulométrica e composicional. A orientação geral do acamamento neste domínio possui mergulhos elevados, chegando a verticalizar (Figura 6.11 e Figura 6.12).

A xistosidade S_n é registrada nos metarenitos pela orientação preferencial de sericitas e grãos de quartzo alongados, nos xistos por micas, cloritas e grãos de quartzo alongados nos

planos desta foliação. A sua relação geométrica com o acamamento apresenta-se de maneira oblíqua, com direção dos mergulhos variando entre os quadrantes nordeste e sudoeste, como observado no estereograma da Figura 6.13.

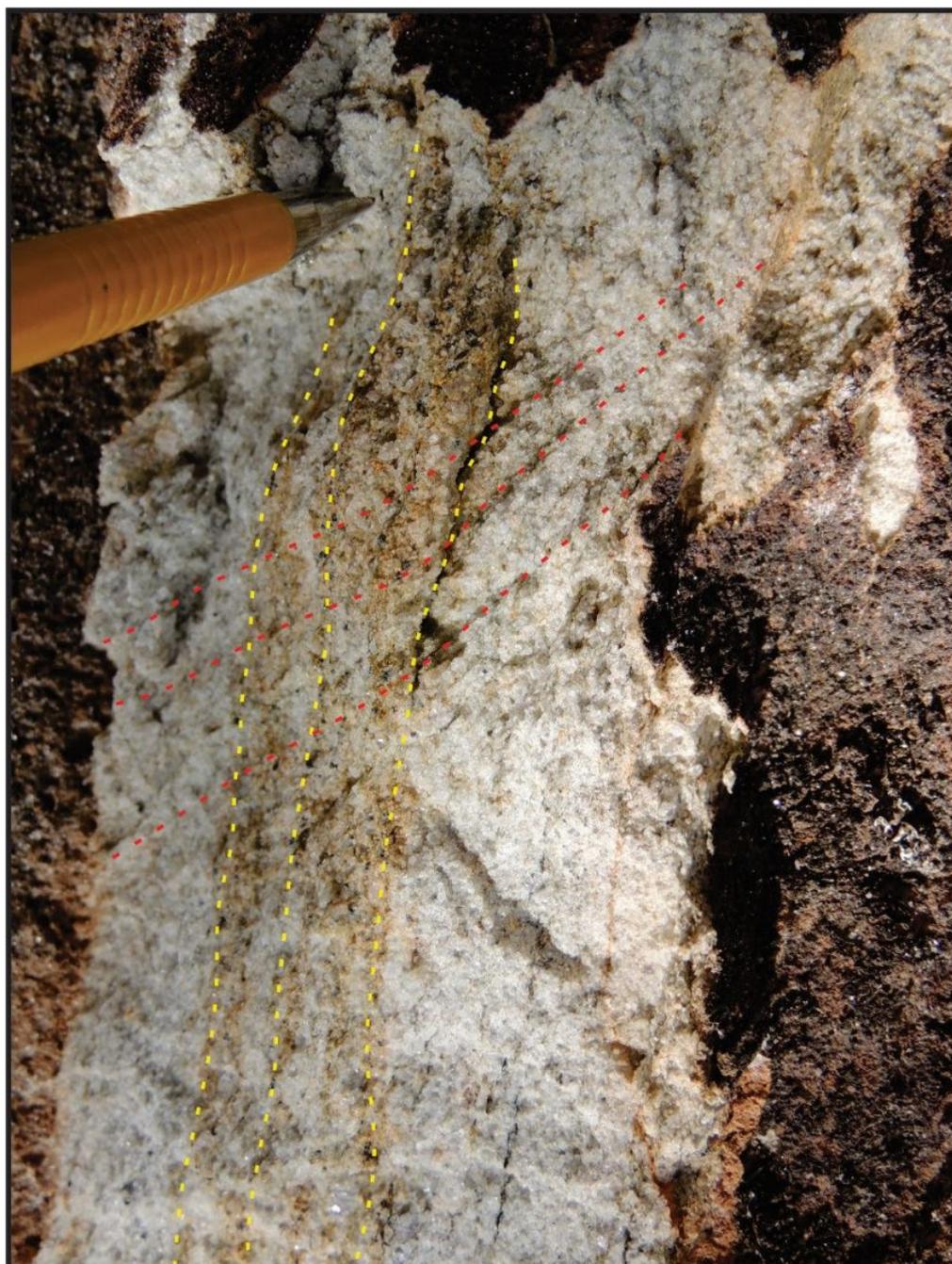


Figura 6.11- Metarenito do Grupo Maquiné, com detalhe para o acamamento, na cor amarela, e xistosidade em vermelho. Visada para oeste no ponto 18, domínio *D*. (Fotografia: Thiago Madeira)



Figura 6.12- Clorita-sericita-quartzo xistos do Grupo Nova Lima com lente de formação ferrífera bandada, marcando o acamamento em alto ângulo. Ponto 26 no domínio *D*, com visada para norte. (Fotografias: Thiago Madeira).

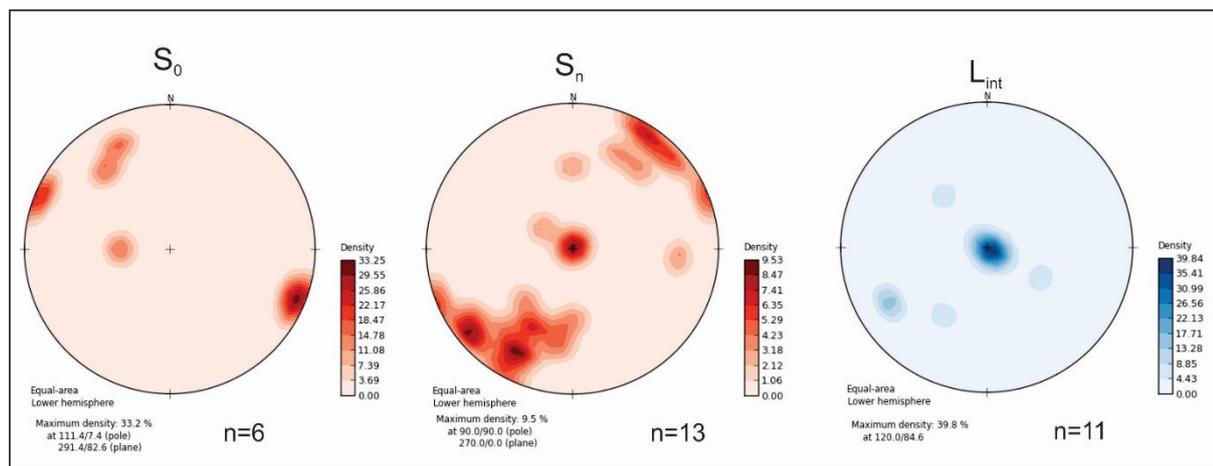


Figura 6.13- Estereogramas dos polos do acamamento (S_b), foliação (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio *D*.

A lineação de interseção resultante da interação entre o acamamento e a xistosidade se mantém verticalizada, com orientação máxima 210/79, segundo o estereograma da Figura 6.13.

A vorticidade da fase de dobramento, dada pela relação geométrica entre o acamamento e a xistosidade é horária no domínio *D*, ocorrendo pontos com vorticidade anti-horária. A medida que se aproxima da porção sul deste domínio, há uma quebra significativa na topografia, como observado no perfil da Figura 6.9, e ocorre mudança na vorticidade predominante para horário, com transporte tectônico para sul. Esta quebra observada na topografia, onde instalou-se o Rio Gualaxo do Sul, cujo curso tem mesma direção que o *trend* das rochas em seu entorno, noroeste-sudeste, foi caracterizada como uma zona de cisalhamento, localizada no limite entre os domínios *D* e *E*.

Foram encontradas ocorrências de óxido de manganês em quantidades consideráveis, associadas aos xistos da Formação Nova Lima, disseminado marcando o acamamento com coloração ocre e também cristalizado com hábito botrioidal e cor negra, possivelmente na forma do mineral psilomelano (óxido de Mn hidratado) (Figura 6.14).

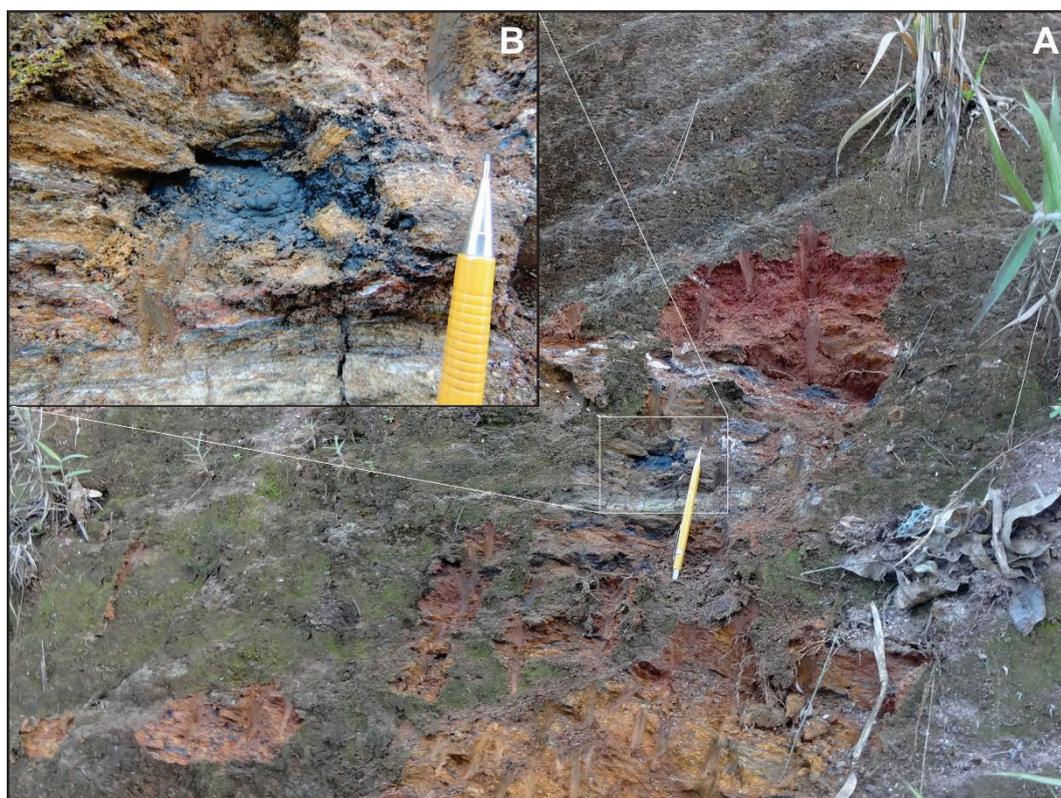


Figura 6.14- (A): ocorrência de óxido de manganês, disseminado ou cristalizado com hábito botrioidal. (B): detalhe na porção onde o se encontra cristalizado. Ponto 26 no domínio D. (Fotografias: Thiago Madeira).

Além da ocorrência mineral de manganês, em conversa com moradores locais, foi relatado a exploração de ouro aluvionar, que ocorre nas margens e leitos dos rios e drenagens daquela região.

Domínio E

O domínio *E*, localizado no extremo sul da seção norte-sul, entre os pontos 19 e 22, é caracterizada pela ocorrência de metarenitos e sericita-quartzo xistos associados ao Grupo Itacolomi, além de ocorrências de quartzo-clorita-sericita xisto com granada do Grupo Nova Lima.

Nos xistos do Grupo Nova Lima, como nos outros domínios, o acamamento sedimentar pode ser discernido com facilidade devido a variação composicional. A xistosidade S_n é marcada por micas e cloritas em seu plano.

Os metarenitos e mica xistos do Grupo Itacolomi possuem acamamento bem marcado por variação composicional, com níveis micáceos, e variação granulométrica, além da presença de laminas de óxido de ferro/magnetita nas estratificações cruzadas, quando possível sua observação (Figura 6.15). A xistosidade S_n é formada pela orientação preferencial de micas e grãos de quartzo alongados no plano da foliação.

O acamamento tem mergulho com ângulos intermediários, com orientação para o quadrante nordeste. A xistosidade S_n possui orientação variando entre os quadrantes sudoeste e nordeste, com ângulos baixos até verticalizados. A lineação de interseção resultante da interação destes dois planos possui alto ângulo de mergulho variando ora para nordeste, ora para sudoeste (Figura 6.16). A vorticidade em torno do eixo dado pela lineação de interseção é horária com transporte para sul, que também pode ser observada em veios de quartzo com formato sigmoidal (Figura 6.17).



Figura 6.15- Estratificação cruzada acanalada em metarenito do Grupo Itacolomi. (Fotografia: Thiago Madeira)

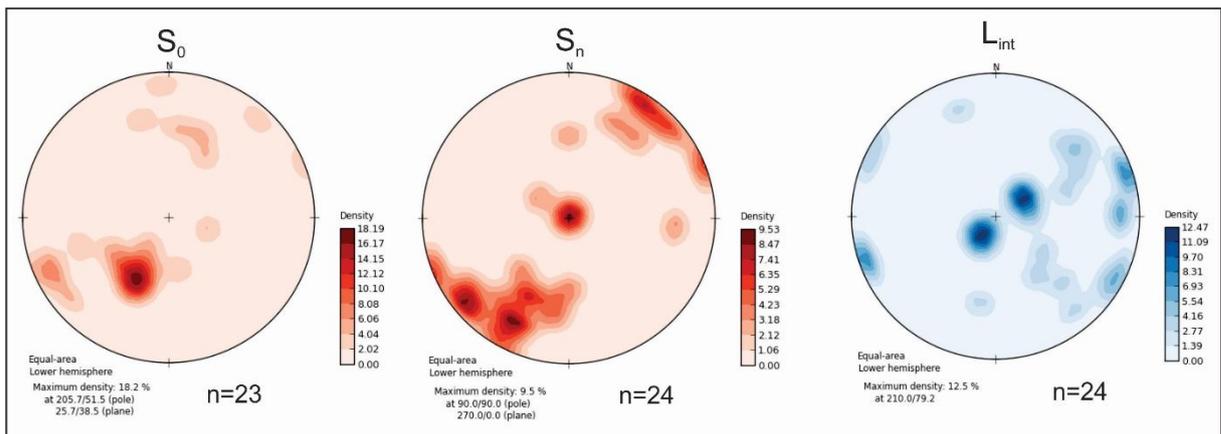


Figura 6.16- Estereogramas dos polos do acamamento (S_b), xistosidade (S_n) e lineação de interseção (L_{int}), respectivamente, no domínio E .



Figura 6.17- Veio de quartzo com formato sigmoidal, indicando vorticidade horária, no domínio E, visada para sul. (Fotografia: Thiago Madeira).

6.3 DISCURSÕES

Os dados colhidos durante a campanha de campo e posterior elaboração dos perfis geológicos deixou evidente a complexidade estrutural da área estudada, com estruturas tectônicas de natureza dúctil, produtos da manifestação de eventos de dobramentos, além de estruturas de natureza rúptil associadas a um *front* de empurrão.

No domínio da Província Geotectônica São Francisco, mais precisamente no Supergrupo Rio das Velhas, foram registradas ao menos duas fases de deformação principais. A primeira de idade Transamazônica, cujos registros mostram tectonismo noroeste-sudeste com vergência para noroeste. A segunda relacionada a orogênese de idade brasileira com tectonismo leste-oeste e transporte tectônico para oeste.

No domínio da Província Geotectônica Mantiqueira, foi registrado um único evento, de natureza compressional, que é condizente ao *front* de empurrão da orogênese Brasileira, com vergência para oeste até noroeste.

A caracterização destas estruturas e análise estrutural tornou-se mais difícil devido à falta de um mapa litológico de detalhe. São poucos os estudos com esta finalidade, fazendo-se necessário trabalhos para melhor entendimento do arcabouço estrutural, bem como um mapeamento geológico, haja visto que os contatos presentes no mapa da CPRM (2014) muitas vezes não condizem com a realidade encontrada em campo, o que é entendível devido a escala do mesmo ser 1:1.000.000.

Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica–estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou um estudo geofísico qualitativo e quantitativo, que possibilitou a realização de análise estrutural do arcabouço tectônico do limite sudeste do Quadrilátero Ferrífero com o Complexo Mantiqueira. Duas importantes províncias geotectônicas denominada, respectivamente, Província Geotectônica São Francisco (PGSF) E Província Geotectônica Mantiqueira (PGM)

Os mapas geofísicos e imagem SRTM foram fundamentais na detecção de estruturas e contrastes geológicos.

Pela análise qualitativa dos diversos mapas magnetométricos (amplitude de sinal analítico, segunda derivada vertical) e radiométricos (canal de Tório e imagem ternária) foi possível identificar o limite entre a Província Geotectônica São Francisco e Província Geotectônica Mantiqueira pela correlação de suas assinaturas geofísicas distintas e marcantes com os litotipos.

Os mapas do canal de Potássio e do parâmetro F evidenciaram lineamentos que correlacionam-se com as ocorrências minerais registradas na área, que em sua maior parte ocorrem no domínio da PGSF relacionadas ao *greenstone belt* Rio das Velhas.

A deconvolução de Euler mostrou-se um método eficaz para a caracterização das anomalias magnéticas em profundidade e suas possíveis implicações associadas aos aspectos estruturais. Foram identificados domínios com diferentes profundidades médias de topo das anomalias magnéticas. Com destaque para a região norte da área, onde ficou evidente uma estrutura de descolamento ou zona de cisalhamento no limite das rochas do Supergrupo Rio das Velhas com o embasamento do Complexo Santa Bárbara, as estimativas de profundidade desta estrutura apresentaram um máximo de 7000 m. Outra estrutura que alcança grandes profundidades ocorre na porção oeste da área, chegando aos 5500 m, no domínio da anticlinal de Mariana, coincidente com o limite entre as rochas do Complexo Santa Bárbara e do Supergrupo Rio das Velhas. Foi levantada a possibilidade que esta estrutura esteja relacionada com a zona de cisalhamento Água Quente.

Nas campanhas de campo realizadas, que possibilitaram a confecção das seções geológicas, ficou claro a necessidade de um mapeamento lito-estrutural de detalhe, haja visto a complexidade do arcabouço estrutural e a carência de mapas em escala de detalhe, principalmente no que diz respeito ao domínio da Província Geotectônica Mantiqueira.

Este trabalho oferece algumas propostas de trabalhos complementares na área de estudo:

- mapeamento estrutural e litológico de detalhe na área, afim de identificar as principais estruturas e cinemática tectônicas, fazendo uma correlação com estruturas geopetais e unidades litológicas;
- geocronologia e geoquímica das unidades litológicas identificadas, além de datação dos eventos hidrotermais correlacionados às mineralizações para entendimento dos modelos de mineralização;
- estudo geofísicos mais abrangentes para identificar o prolongamento das principais estruturas identificadas, como a zona de cisalhamento Água Quente e da zona de cisalhamento rica em mineralizações de ouro no sudeste da área.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Tranzamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region Minas Gerais, Brasil: evidence for Paleozoic collisional and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V, *et al.* (ed.) *Geologia do Continente Sul-Americano*. São Paulo, Beca, 17-34.
- Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz S.C.P., 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., Noce C.M., Cruz S.C.P. 2007. Sobre a evolução tectônica do orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos.*, 15 (1), 25-43.
- Almeida L.G., Endo I., Fonseca M.A. 2002. Sistema de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, Mg. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, *Anais*, p. 615.
- Almeida L.G., Endo I., Fonseca M.A. 2003. Geologia do Sinclinal Dom Bosco: uma visão atual dos conhecimentos. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Ouro Preto, Anais, arquivo eletrônico.
- Almeida L. G. 2004. *Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais*. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, 109 p.
- Almeida L.G., Castro P.T.A., Endo I., Fonseca M.A. 2005. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bom, Quadrilátero Ferrífero: Uma revisão estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências* 35(2005): 1-12.
- Baltazar O.F., Baars F.J., Lobato L.M, L.B, Achtschin A.B., Berni G.V., Silveira V.D. 2005. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Lobato *et al.* (2005). Belo Horizonte, CODEMIG.
- Baltazar O.F., Raposo F.O. (ORG.). 1993. Texto explicativo e mapas (geológico e metalogenético), escala 1:100.00. Mariana, Folha SF-23-X-B-I, Estado de Minas Gerais. Brasília: DNPM-CPRM: Programas Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. 200p
- Baltazar O.F. & Zucchetti M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32 (2007) 407-499.
- Bernardes V.H.R. 2016. Análise geológica-geofísioica da quadricula NE da Folha Catas Altas, MG. Trabalho de Conclusão de Curso, DEGEO/EM/UFOP, 110p.
- Castro, M.P., 2014. *Caracterização Geológica da Formação Capelinha Como Uma Unidade Basal Do Grupo Macaúbas Em Sua Área Tipo, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 116 p.
- CODEMIG – Companhia De Desenvolvimento Econômico De Minas Gerais 2001. Levantamento aerogeofísico, magnetometria e gamaespectrometria,
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil 2014. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, 1:1.000.000.
- Dickson B.L., Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*. 17: 187-200.
- Dentith M., Mudge S.T. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. 426p.
- DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. Registro de ocorrências minerais no estado de Minas Gerais. Arquivo shapefile extraído de <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/> em 01/12/2016.

- Neves, M. E. A., 2017. Análise geofísica-estrutural da zona limítrofe entre as províncias geotectônicas..
- Dorr II J.V. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. United States Geological Survey Professional Paper 614-A. 110pp.
- Durrhein R.J & Cooper G.R.J., 1998. EULDEP: a program for the Euler deconvolution of magnetic and gravity data. Elsevier – Computer & Geosciences. 24(6): 545-550.
- Endo I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 243p.
- Endo I, Oliveira A. H., Peres G.G., Guimarães M.L.V., Lagoeiro L.E., Machado R., Zavaglia G., Rosas C.F, Melo R.J. 2005. Nappe Curral: Uma Megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV International Symposium on Tectonics, Curitiba. Boletim de resumos expandidos. P.279-282.
- Eschewege W.L.Von. 1833. Pluto Brasiliensis. Trad.1979, São Paulo, Editora Universidade de São Paulo, 306pp.
- Ferreira Fº F. A. 1999. *Análise Estrutural Qualitativa do Sistema de Falhas de Água Quente, Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. 162p.
- Filho C. O. A. & Fonseca L. M. G. 2009. Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, *Anais*, 23-30,9.3151-3158.
- Grohmann C.H. 2004. *Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas à Análise Morfométrica*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado,78p.
- Hassui Y., Haralyi N.L.E., Costa J.B.S. 1993. A megaestruturação do Pré-Cambriano brasileiro com base em dados geofísicos. *Geociências*, 12:7-31.
- Jordt-Evangelista, H. 1985. Petrologia de fases, geotermometria e geobarometria do Complexo Granulítico de Acaiaca, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: III Simp. Geol. Minas Gerais, SBG, Belo Horizonte, *Anais*, 165-178
- Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de exploração. Tradução: Coelho M.C.M. Oficina de Textos, São Paulo, 438 p.
- Ladeira E.A. 1980. Metallogenesis of gold at the Morro Velho mine and in the Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. PhD. thesis, University of Western Ontario, Canadá, Ontario. 272 p.
- Lobato, L.M.; Baltazar, O.F.; Reis, L.B.; Achtschin, A.B.; Baars, F.J.; Timbó, M.A.; Berni, G.V; Mendonça, B.R.V. de; Ferreira, D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 1 CD-ROM
- Madeira, T.J.A. 2016. *Análise Geofísica e Estrutural da Zona de Cisalhamento São Vicente, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 186p.
- Madeira T.J.A., Endo I., Barbosa M.S.C, Borges A.J., 2017. Geophysical and structural analysis of the gold metallogenesis and structural evolution in the eastern portion of the Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017, (*no prelo*).
- Medeiros Júnior E.B. 2009. *Petrogênese do Complexo Acaiaca, MG*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 101p.
- Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Silva L.C., Alkmim F.F. 2007. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do orógeno Araçuai. *Geonomos.*, 15 (1), 17-23.
- Ostrovskiy E.Ya. 1975. *Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aero gamma spectrometric prospecting*. International Geology Review, 17(4):476-468.

- Pastori M.P. 2010. Mapeamento geológico em escala de 1:5.000 da localidade de Fazenda Trindade, Município de Caeté, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 59p.
- Pedrosa-Soares A.C., Alkmim F.F., Tack L., Noce C.M., Babinski M., Silva L.C., Martins- Neto M. 2008. Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo orogen. *Geological Society of London, Special Publications.*, **294**: 153-172.
- Raposo F.O. (org.) 1991. *Rio Espera, Folha SF.23-X-B-IV, Estado de Minas Gerais*. Texto explicativo e mapas em escala 1:100.000 (geológico e metalogenético). Brasília, DNPM-CPRM (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB), 200p.
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millett A.J. & Somerton I.W. 1990. *Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*. *Geophysics*, 55: 80-91.
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 M.a de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. *Geonomos* 2(1): 1-11.
- Ribeiro V. B., Mantovani M. S. M., Louro V. H. A. 2013. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terra Didática*. 10:29-51 2013.
- Rossi D. Q. 2014. *Estratigrafia e arcabouço estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, 129p.
- Rossi D.Q. & Endo I. 2015. A structural modelo f the Fábrica Nova region, Santa Rita syncline, Quadrilátero Ferrífero: flankin folds as a folding mechanism. *R. Esc. Minas, Ouro Preto*, 68(2), 153-162.
- Teixeira W. 1985. *A evolução geotectônica da porção meridional do Cráton do São Francisco com base em interpretações geocronológicas*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 207p.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.
- Uhlein A. & Noce C.M. 2012. Quadrilátero Ferrífero. *In* Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli A. (eds) *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 228-229.