



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOFÍSICO DA REGIÃO DE SANTA MARIA DE ITABIRA E
FERROS, MINAS GERAIS, BRASIL.**

Laura Frota Campos Horta

MONOGRAFIA n° 244

Ouro Preto, agosto de 2017

**ESTUDO GEOLÓGICO E GEOFÍSICO DA REGIÃO DE
SANTA MARIA DE ITABIRA E FERROS, MINAS GERAIS,
BRASIL.**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Luís Antônio Rosa Seixas

MONOGRAFIA

Nº 244

ESTUDO GEOLÓGICO E GEOFÍSICO DA REGIÃO DE SANTA MARIA DE ITABIRA E FERROS, MINAS GERAIS, BRASIL.

Laura Frota Campos Horta

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 para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2017/1.

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: Laura Frota Campos Horta

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

H821e Horta, Laura Frota Campos

Estudo geológico e geofísico da região de Santa Maria de Itabira e Ferros,
Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Laura Frota Campos Horta - 2017.

84 f.; il. color.; grafs.; tabs.; mapas

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Silvia Carvalho Barbosa.

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

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO GEOLÓGICO E GEOFÍSICO DA REGIÃO DE SANTA MARIA DE ITABIRA E FERROS, MINAS GERAIS, BRASIL.

AUTOR: Laura Frota Campos Horta

ORIENTADORA: Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Maria Sílvia Carvalho Barbosa _____ DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano _____ DEGEO/UFOP

Prof. M.Sc. Thiago J. Augusto Madeira _____ DEGEO/UFOP

Ouro Preto, ____/____/____

Agradecimentos

Agradeço, em especial, à Maria Sílvia Carvalho Barbosa, pela orientação, paciência, disponibilidade e atenção indiscutíveis. À geologia e aos mestres pelos ensinamentos durante a minha graduação, especialmente, Scholz, Adivane e Tazava. Ao Júlio Magalhães Pires Duarte pelo apoio.

Agradeço aos amigos da geologia e ao PET Eng. Geológica, por serem responsáveis pelo meu crescimento acadêmico e por me tornarem uma pessoa melhor. Agradeço ao Novos pela melhor trilha sonora que esse TCC poderia ter. Às moradoras da minha amada Tanto Faz pelo incentivo, compreensão e paciência, especialmente Bia e Paula, pela geologia em comum. Oswaldo pela correção implacável.

Agradeço ao DEGEO, à Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas e à Fundação Gorceix, por todo o apoio e ensino público e de qualidade durante a minha graduação. À todos aqueles que contribuíram, de toda e alguma forma, para a realização deste trabalho, meu muito obrigada!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Localização e Vias de Acesso	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodologia.....	4
1.4.1 Revisão Bibliográfica	4
1.4.2 Aquisição de dados.....	4
1.4.3 Confecção dos Mapas Temáticos	5
1.4.4 Análise Qualitativa	5
1.4.5 Integração Geológica Geofísica.....	5
1.4.6 Análise Quantitativa	6
1.4.7 Atividade de Campo	6
1.4.8 Redação da Monografia e Apresentação	6
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 Estratigrafia	7
2.1.1 Arqueano	8
2.1.2 Mesoproterozoico / Paleoproterozoico	9
2.2 Evolução Geotectônica.....	10
2.3 Geologia Estrutural.....	11
3 BERILOS.....	13
3.1 Berilo.....	15
3.1.1 Esmeralda	16
3.1.2 Água-Marinha	19
4 MÉTODOS GEOFÍSICOS	23
4.1 Magnetometria.....	24
4.2 Radiometria	28
5 ANÁLISE QUALITATIVA	33
5.1 Banco de Dados Geofísico	33
5.2 Análise Radiométrica	34
5.3 Análise Magnetométrica.....	39

5.4 Banco de Dados Geológico.....	43
5.5 Integração Geológica e Geofísica	43
6 ANÁLISE QUANTITATIVA.....	49
6.1 Introdução	49
6.2 Metodologia.....	49
6.3 Resultados das inversões pela Deconvolução de Euler	51
6.4 Visualização em 3D	54
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	61
7.1 Introdução	61
7.2 Discussão	61
7.3 Considerações de Campo.....	65
7.4 Regiões de Interesse.....	72
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de localização e vias de acesso referenciando a região estudada em relação ao estado de Minas Gerais, a capital Belo Horizonte e o Brasil.	3
Figura 3.1. Ocorrência de gemas berilíferas (água-marinha, morganita, heliodoro, goshenita e esmeralda) no estado de Minas Gerais.	13
Figura 3.2. Província Pegmatítica Oriental do Brasil e localização da região de estudo de estudo neste contexto.	14
Figura 3.3. A. Esmeralda, Itabira – MG; B. Água-Marinha, Mina de Piteiras, Nova Era – MG; C. Heliodoro, MG; D. Morganita, Galiléia – MG; E. Bixbita, Utah – USA; F. Goshenita,	16
Figura 3.4. Esmeralda lapidada com 0,5cm e 0,7cm de dimensão.	17
Figura 3.5. Província Esmeraldífera de Minas Gerais	18
Figura 3. 6. Águas-marinhas lapidadas, tamanhos variam entre 0,4 e 0,8cm.	19
Figura 3.7. Água-marinha Tiradentes, 65kg, 55cm de altura e aproximadamente 40cm de diâmetro.	20
Figura 4.1. Histograma representativo dos valores médios de susceptibilidade dos diferentes tipos litológicos mais abundantes	26
Figura 4.2. Quantidade relativa de radioelementos nos tipos de rochas mais comuns	30
Figura 4.3. Variação dos teores dos radioelementos potássio, urânio, tório em rochas ígneas em relação aos seus diferentes teores de sílica (Si).	30
Figura 5.1. Projeto Itabira Ferros no estado de Minas Gerais e disposição geográfica da área de estudo nos limites deste projeto.	34
Figura 5.2. Fluxograma dos mapas radiométricos temáticos gerados no <i>software OASIS MONTAJ 7.0.1</i> , nomenclatura vide texto.	35
Figura 5.3. A. Mapa com as radiofácies definidas; B. Imagem Ternária original.	36
Figura 5.4. A. Mapa com as radiofácies definidas e os lineamentos interpretados; B. Mapa de Tório; C. roseta (produzida no OpenStereo) com as respectivas direções dos lineamentos.	38
Figura 5.5. Fluxograma dos mapas magnetométricos temáticos gerados no <i>software OASIS MONTAJ 7.0.1</i>	40
Figura 5.6. Mapa de ASA original da região de estudo à direita e magnetofácies sobrepostas à esquerda.	41
Figura 5.7.A Mapas das magnetofácies e lineamentos interpretados; B. Mapa de ASA original; C. Roseta (produzida no <i>OpenStereo</i>) com as respectivas direções dos lineamentos traçados.	42
Figura 5.8. Mapa geológico da região de estudo.	44

Figura 5.9.A. Mapa geológico da área de estudo B. Mapa de amplitude e sinal analítico (ASA) com lineamentos interpretados a partir dos dados magnetométricos.	47
Figura 5.10.A. Mapa geológico da área de estudo. B. Mapa de magnetofácies.....	48
Figura 6.1. 14 perfis E-W traçados no mapa de Amplitude e Sinal Analítico.	50
Figura 6.2. Perfis 4, 8 e 12, respectivamente, selecionados para ilustração dos resultados obtidos. ...	51
Figura 6.3. Perfil 4 de deconvolução realizado no <i>software Euler 1.0</i> a partir do mapa de ASA. O perfil mostra A. dados gerados; B. gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho);	52
Figura 6.4. Perfil 8 de deconvolução realizado no <i>software Euler 1.0</i> a partir do mapa de ASA. O perfil mostra A. dados gerados; B. gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho);... ..	53
Figura 6.5. Perfil 12 de deconvolução realizado no <i>software Euler 1.0</i> a partir do mapa de ASA. O perfil mostra A. dados gerados; B. gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho);... ..	54
Figura 6.6. Visualização dos dados das anomalias magnetométricas (relação anomalia e profundidade estimada) com base no mapa de ASA por meio do <i>ArcScene 9.3</i>	55
Figura 6.7. Visualização das etapas da análise quantitativa; A. Respostas da deconvolução de Euler no <i>software Euler 1.0</i> ; B. Visualização dos perfis traçados no mapa de ASA. C. Inversão	56
Figura 6.8. A. Modelo 3D da área de estudo realizado por meio do método de <i>krigagem</i> no <i>ArcScene 9.3</i> com o mapa de ASA sobreposto; B. Visualização do Modelo 3D confeccionado; C. Perfil.....	58
Figura 6.9. Visualização superior e inferior do modelo 3D da área estudada gerado por intermédio do método de <i>krigagem</i> no <i>software ArcScene 9.3</i>	59
Figura 7.1. Mapa do canal de tório (Th).....	62
Figura 7.2. A. Mapa probabilístico das áreas potenciais para prospecção de esmeralda e água-marinha na região de Santa Maria de Itabira e Ferros – MG. B. Mapa Geológico da região de estudo.	64
Figura 7.3.A. Flogopita xisto em contato com o granitoide do Grupo Guanhões aflorante no ponto 1, direção de continuação deste corpo rochoso foi tirada em N20E; B. Xisto aflorante.	66
Figura 7.4. Fotografia tirada no ponto 1 para caracterizar <i>steps</i> de falha observados no plano de falha, mostrando o sentido indicado pela seta, configurando falha de empurrão.	66
Figura 7.5.A. Quartzo leitoso; B. Quartzo com óxido de manganês – psomelana.	67
Figura 7.6. Granadas aflorantes no ponto 2 da visita de campo realizada entre os dias 22 e 23 de julho.	68
Figura 7.7.A. Granadas <i>insitu</i> em associação com anfibólio, biotita e cordierita; B. Imagem de detalhe mostrando a ocorrência da cordierita e granada lado a lado (rocha <i>insitu</i>); C. Amostra.....	69

Figura 7.8. Granadas lapidadas provenientes do afloramento visitado (ponto 2).	69
Figura 7. 9. A. Garimpo recém-descoberto (ponto 3); B. Antiga cava produtora de águas marinhas (ponto 4).	70
Figura 7.10.A. Mapa de Amplitude e Sinal Analítico sobreposto pelos contatos litológicos e pontos de campo visitados com destaque para o polígono azul. B. Mapa Geológico da área de estudo	71
Figura 7.11. A. Mapa probabilístico das áreas potenciais para ocorrência de esmeralda e água-marinha e áreas de interesse secundárias e Mapa de Fator F como (<i>background</i>); B. Mapa Geológico	73
Figura 7.12. A. Mapa Probabilístico com <i>background</i> dos dados da Deconvolução de Euler, em planta, com as profundidades estimadas apresentadas pela escala de cor (metros); B. Mapa	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Métodos geofísicos correlacionados às propriedades físicas medidas analisadas.	23
Tabela 4.2. Relação entre os índices estruturais e os índices geológicos e físicos.....	28
Tabela 4.3. Relação entre os radioelementos e os respectivos minerais e rochas de ocorrência.....	29
Tabela 4.4. Assinatura radioativa das rochas ígneas.	29
Tabela 5.1. Radiofácies interpretadas na área de estudo e suas concentrações relativas de Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th).....	36
Tabela 5.2. Correlação entre as respostas radiométricas e as unidades litológicas presentes na área de estudo.	45

Resumo

A região de Santa Maria de Itabira e Ferros foi alvo do presente estudo que, por sua vez, teve como principal objetivo a identificação de áreas potenciais para possíveis depósitos berilíferos; mais especificamente esmeralda e água-marinha. A delimitação das áreas de interesse se deu a partir da aplicação do método de mapeamento geológico e geofísico integrado e técnica intuitiva gráfica para reconhecimento de possíveis áreas alvo de depósitos dos minerais gema supracitados. Para realização deste trabalho, foram utilizados dados geofísicos aerolevantados de magnetometria e radiometria (escala 1:25.000) do Programa de Levantamentos do Projeto Itabira-Ferros, bem como os dados geológicos publicados no mapa geológico de Minas Gerais (escala 1:100.000) em 2014 pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig) em parceria com Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A área de estudo - inserida nas folhas Ipatinga e Conceição do Mato Dentro pertencentes ao Projeto Leste e Espinhaço, respectivamente -, abrange uma região de 900km² entre Santa Maria de Itabira e Ferros. Dessa forma, para o desenvolvimento deste estudo, foram realizadas as seguintes etapas: revisão bibliográfica, processamento dos dados nos *softwares Oasis Montaj Geosoft 7.01, ArcGis 9.3, OpenStereo 0.1.2 e Euler 1.0*, integração geológica-geofísica, atividade de campo para confirmação das interpretações integradas realizadas. Assim, a partir da integração do conhecimento da gênese da esmeralda e água-marinha na região investigada e análise integrada entre os mapas temáticos gerados a partir dos dados geofísicos e geológicos, foi possível identificar áreas potenciais para prospecção de esmeraldas.

Palavras chave: Santa Maria de Itabira, Ferros, Minas Gerais, esmeralda, água-marinha, geofísica, magnetometria, radiometria.

Abstract

The region of Santa Maria de Itabira and Ferros was the target of the present Work of Course Conclusion that, in turn, had as its principal aim, to identify potential areas for eventual beryliferous deposits, more specifically emeralds and aquamarines. The delimitation of the interest areas was carried out through the application of the method of integrated geological and geophysical mapping and graphic intuitive technics in order to recognize eventual target areas of deposit of the mineral gem aforesaid. In order to carry this work out, it was utilized aero-collected geophysical data of magnometrics and radiometrics (scale 1:25.000), from the Program of Data Collecting of the Project Itabira-Ferros, as well as the geological data published in the geological map of Minas Gerais (scale 1:100.000) in 2014 by the Company of Economic Development of Minas Gerais (Codemig), in partnership with the Geological Service of Brazil (CPRM). The area of study – inserted in the Ipatinga and Conceição do Mato Dentro Geological Maps, which belong to Project East and Espinhaço, respectively -, comprehends a region of 900 km² between Santa Maria de Itabira and Ferros. Thus, to develop this study, the following steps wer carried out: bibliographic review, data processing through the softwares Oasis Montaj Geosoft 7.01, ArcGis 9.3, OpenStereo 0.1.2 and Euler 1.0, geological-geophysical integration, field activity in order to confirm the integrated interpretation carried out, and development of this paper. Thereby, from the integration of the emerald and aquamarine genesis knowledge in the area investigated and integrated analysis among the thematic maps generated from the geophysical and geological data, it was possible to identify potential areas for emerald prospection.

Key words: Santa Maria de Itabira, Ferros, Minas Gerais, Brazil, emerald, aquamarine, geophysics, magnometrics, radiometrics.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das mais importantes províncias gemológicas presentes no mundo se encontra em território mineiro. O estado de Minas Gerais (MG) é considerado, se não o maior, um dos maiores produtores de ouro e gemas do Brasil. É responsável, atualmente, por aproximadamente 40% das exportações de gemas e metais preciosos do país. O setor minerário (indústria extrativa e de transformação mineral) contribui com cerca de 7% do PIB do estado de MG. Destaca-se a região do Quadrilátero Ferrífero pela exploração de ouro, ferro, topázio, esmeralda ¹, dentre outras riquezas minerais (Castañeda *et al.* 2001).

Os primeiros registros de ocorrências de gemas em Minas Gerais estão associados às campanhas de entradas de bandeirantes durante o período colonial, que rumaram para o interior do território brasileiro em busca de riquezas minerais. Historicamente, as primeiras descobertas de gemas em MG estão datadas de 1554 (Castañeda *et al.* 2001). Existem registros de produção de topázio na região de Ouro Preto a partir da segunda metade do século XVIII. Nesse mesmo período, durante o auge do ciclo do ouro, produziu-se na região de Ouro Preto mais de 1000 toneladas de ouro, até o final do século XVIII.

Ainda que os bandeirantes tenham percorrido grandes áreas do território brasileiro durante o período colonial em busca de ouro, diamante e esmeralda, as esmeraldas nunca foram descobertas. Isso ocorreu na segunda metade do século XX, com as descobertas das jazidas de Salininha (1963) e Carnaíba (1964), na Bahia, e em Itabira, região hoje inserida na Província Esmeraldífera de Minas Gerais, em 1978, tornando-se assim pública as descobertas das esmeraldas brasileiras (César-Mendes 1989). A Jazida da Fazenda das Piteiras foi a mais recente importante jazida de esmeralda descoberta em MG no ano de 2000 (César-Mendes 2000).

Nesse contexto, a área de estudo do presente Trabalho de Conclusão de Curso - localizada no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero - está compreendida entre os municípios de Ferros e Santa Maria de Itabira - microrregião de Itabira - na porção leste do estado de Minas Gerais. O presente estudo visa a determinação de áreas potenciais para prospecção de algumas das variedades gemológicas do berilo - esmeralda (cor verde grama); água-marinha (cor azul ou esverdeada) - a partir

¹ Ressalta-se que, no presente trabalho de conclusão de curso, o termo comercial esmeralda será utilizado como termo representativo para o mineral berilo de coloração verde grama de valor gemológico.

do desenvolvimento de técnicas de mapeamento geológico e geofísico. Devido à maior importância econômica das esmeraldas, pode-se afirmar que as possíveis áreas de interesse para prospecção das mesmas serão enfatizadas nesta dissertação.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A região de estudo compreende 900km² de área situada nos municípios de Santa Maria de Itabira e Ferros (Figura 1.1). A cobertura geológica desta área está presente no Projeto Leste - Folha Ipatinga (SE.23-Z-D-II), escala 1:100.000, bem como no Projeto Espinhaço – Folha Conceição do Mato Dentro, escala 1:100.000 (Oliveira & Leite 2000; Grossi-Sad *et al.* 1997). Além disso, a região possui cobertura aerogeofísica de semidetalhe correspondente ao Projeto Itabira-Ferros, realizado na escala de 1:25.000.

Localizada a aproximadamente 215km da capital de Minas Gerais, o acesso à região investigada, a partir Belo Horizonte, é realizado pela BR-381 até Bom Jesus do Amparo e em seguida pela MG-434 até a cidade de Itabira, e então através da BR-120 até os arredores de Santa Maria de Itabira e Ferros.

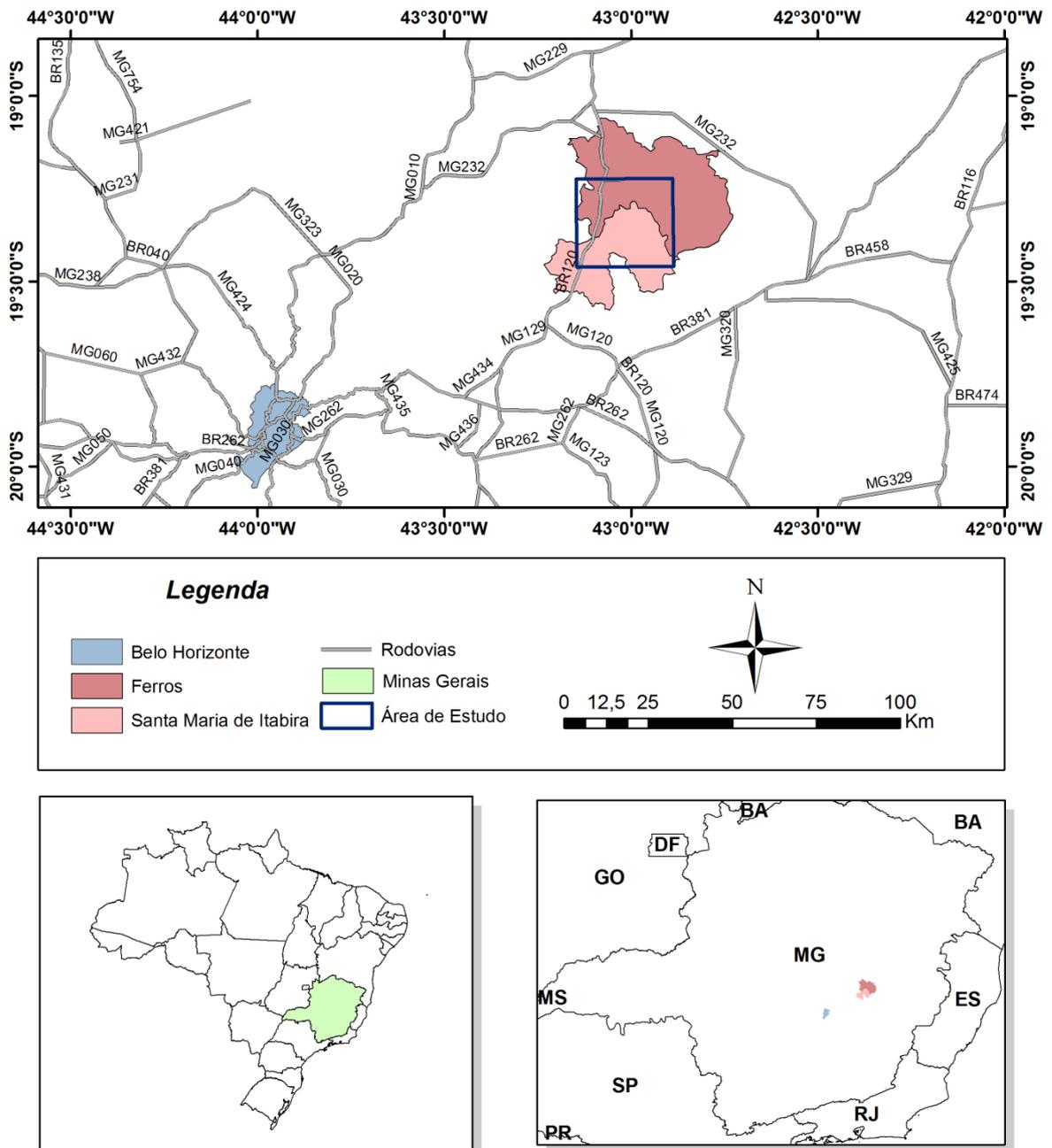


Figura 1.1. Mapa de localização e vias de acesso referenciando a região estudada em relação ao estado de Minas Gerais, a capital Belo Horizonte e o Brasil.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos principais que permeiam este Trabalho de Conclusão de Curso consistem na identificação de áreas potenciais para mineralização de gemas - variedades do berilo – por meio da aplicação integrada de técnicas de mapeamento geológico e geofísico e técnica gráfica intuitiva na região de Santa Maria de Itabira e Ferros, MG. Dessa forma, destacam-se as seguintes metas:

- caracterização da geologia regional a partir da bibliografia consultada, relacionada à ocorrência de depósitos gemológicos;
- compreensão da gênese da esmeralda e outras gemas derivadas do berilo;
- construção de mapas temáticos magnetométricos e radiométricos da região de estudo, bem como sua interpretação a fim de identificar áreas alvo para prospecção de gemas;
- análise qualitativa realizada a partir do processamento e da interpretação integrada dos dados geológicos e geofísicos utilizados, além da gênese do berilo na região para melhor definição de possíveis zonas mineralizadas;
- análise quantitativa a partir dos dados magnetométricos para estimar a profundidade das fontes geradoras;
- identificação de fatores controladores e/ou critérios que definam a mineralização das gemas estudadas na área investigada, especialmente a mineralização de esmeralda.

1.4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado de acordo com as seguintes etapas realizadas de maneira concomitante e sistemática: revisão bibliográfica, aquisição dos dados aerogeofísicos e geológicos, confecção dos mapas temáticos, análise qualitativa, integração geológico geofísica, análise quantitativa, atividade de campo, redação da monografia e apresentação.

1.4.1 Revisão Bibliográfica

A parte inicial deste projeto contou com o levantamento bibliográfico sobre geologia regional, evolução tectônica, ocorrência de gemas e variações minerais do berilo e gênese das mesmas. Também foram pesquisados nessa fase, estudos de caso que abordam o desenvolvimento de modelos geológicos e geofísicos aplicados à prospecção mineral, assim como bibliografia referente aos métodos geofísicos aplicados - radiometria e magnetometria - e método de inversão (Deconvolução de Euler).

1.4.2 Aquisição de dados

De maneira geral, utilizaram-se como base deste trabalho os dados dos mapeamentos geológicos 1:100.000 realizados por Oliveira & Leite (2000) e Grossi-Sad *et al.* (1997) publicados nas folhas Ipatinga (SE.23-Z-D-II) e Conceição do Mato Dentro (SE.23-Z-D-I), respectivamente. Os dados aerogeofísicos de radiometria e magnetometria utilizados pertencem aos levantamentos realizados e publicados no projeto Itabira-Ferros em 1996. Ambos os dados foram concedidos pela CPRM.

1.4.3 Confecção dos Mapas Temáticos

A partir dos dados magnetométricos e radiométricos adquiridos na etapa anterior, foram gerados mapas temáticos no software *Oasis Montaj Geosoft 7.01*. Dessa forma, a partir da geração de arquivo no formato “.gdb” e as informações importadas, estas foram conjuntamente trabalhadas seguindo a rotina “WINXY” com arquivos no formato “.xyz”. Os dados foram processados visando a interpretação e correlação com a geologia da área estudada.

O banco de dados foi interpolado segundo uma malha constante de 300m para confecção dos seguintes mapas temáticos radiométricos: canais de potássio (K), canais de urânio (U), canais de tório (Th), canais de contagem total (CT); razões entre eU/Th, eU/K, eTh/K; mapa de parâmetro F e imagem ternária. De maneira análoga, foram gerados os mapas magnetométricos: campo anômalo (CA), amplitude do sinal analítico (ASA), derivada da amplitude do sinal analítico (DASA), primeira derivada vertical (Dz), derivada em X (Dx) e derivada em Y (Dy).

1.4.4 Análise Qualitativa

Esta fase consistiu-se na interpretação dos mapas radiométricos e magnetométricos gerados na fase anterior. Fez-se então um estudo dos aspectos estruturais mais marcantes presentes na área investigada. Assim, os lineamentos observados foram delimitados e plotados em rosetas para interpretação a partir do *software OpenStereo*.

Foi realizada ainda a interpretação das respostas geofísicas de ambos os métodos trabalhados a partir da sua integração e observação dos dados geológicos da região de estudo no *software ArcGis 9.3*. Foram então determinadas magnetofácies e radiofácies, baseadas, principalmente, no mapa de amplitude e sinal analítico (ASA) e mapa geológico da região, respectivamente.

A radiometria, devido à sua superficialidade, possibilitou o reconhecimento litológico em superfície, tornando-se um importante auxiliar da identificação de litotipos e zonas de contato. Já o uso da magnetometria foi essencial para análises em profundidade, uma vez que esse método é capaz de caracterizar as rochas em subsuperfície em relação à sua susceptibilidade magnética.

1.4.5 Integração Geológica Geofísica

A partir da interpretação dos mapas temáticos confeccionados referentes à fase anterior, tornou-se possível a integração destes mapas com os dados geológicos da área investigada com o uso do *ArcGis 9.3*. Logo, desenvolveu-se nesta etapa do trabalho, uma interpretação integrada entre as informações obtidas na análise qualitativa em relação ao contexto geológico da área estudada.

Ressalta-se que os critérios geológicos e geofísicos estudados a partir da revisão bibliográfica, assim como as gêneses das gemas ocorrentes na região, possuem grande importância na análise apropriada destes mapas, uma vez que tais informações são imprescindíveis para identificação de

critérios controladores e determinação das possíveis regiões detentoras de mineralizações, principal objetivo deste trabalho.

1.4.6 Análise Quantitativa

Refere-se à análise realizada por meio da aplicação do método de Deconvolução de Euler, que permite analisar quantitativamente a profundidade das anomalias geológicas assim como seu condicionamento estrutural e visualização tridimensional das mesmas.

O processamento do método de inversão aplicado é realizado a partir da utilização da versão livre do *software Euler 1.0*. Nesse caso, foi realizado a partir de 14 perfis magnetométricos representativos da área, traçados no *ArcGis 9.3* na direção E-W com espaçamento fixo de 2000m. O *ArcGis 9.3* ainda foi utilizado para elaboração do modelo em 3D ao utilizar o método de *krigagem* efetuado no *ArcScene*, auxiliando na análise integrada dos dados produzidos em conjunto com as informações geológicas e geofísicas previamente estudadas por meio de perfis esquemáticos.

1.4.7 Atividade de Campo

A etapa de campo foi realizada entre os dias 22 e 23 em julho de 2017, com o objetivo de confirmar a potencialidade das áreas previamente definidas como áreas alvo na região estudo. Portanto, esta etapa foi previamente planejada, de maneira que foram estudadas coordenadas estratégicas para visitação das regiões de interesse.

As áreas investigadas foram selecionadas de acordo com o grau de facilidade de acesso aos às zonas de interesse pré-determinadas a partir da integração dos resultados obtidos nas etapas anteriores deste estudo. Uma vez concluídas a etapa de campo, foi realizada a integração dos dados em conjunto com as demais informações obtidas nas etapas anteriores, visando a determinação final das áreas potenciais para prospecção das diversas variedades do berilo de valor gemológico ocorrente na região de estudo, principalmente, esmeralda.

1.4.8 Redação da Monografia e Apresentação

Trata-se da etapa final deste Trabalho de Conclusão de Curso, caracterizada pela nota explicativa de todas as etapas realizadas e as informações obtidas durante o desenvolvimento deste estudo. Para avaliação deste estudo foi realizada, ainda, uma apresentação para uma banca avaliadora, contemplando de maneira resumida as informações resultantes apresentadas nesta monografia.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Este capítulo visa apresentar os principais aspectos geológicos da região de estudo, inserida nas folhas Ipatinga (SE.23.Z-D-II) e Conceição do Mato Dentro (SE.23.Z-D-I), na escala 1:100.000, pertencentes aos projetos Leste e Espinhaço, respectivamente (Oliveira & Leite 2000, Grossi-Sad *et al.* 1997). A área investigada abrange 900km² e está localizada a NE da cidade de Itabira, situada no extremo nordeste do Quadrilátero Ferrífero.

Duas grandes províncias geotectônicas englobam a área investigada: a Província Geotectônica ou Estrutural Mantiqueira e Província Geotectônica do São Francisco. A primeira é caracterizada por gnaisses do tipo TTG, com rochas máficas e ultramáficas associadas, e, a segunda constituída principalmente por sequências metavulcanossedimentares tipo *greenstone* e granitoides.

A região ainda faz parte da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, localizada na faixa Araçuaí e no Cinturão Atlântico. De acordo com Correia Neves *et al.* (1986), Marciano (1995), Nalini Jr. (1997) e Gandini (1999), esta província é composta por corpos pegmatíticos de idade associada às manifestações pós-tectônicas tardias do Orógeno Brasileiro. São corpos de origem ígnea (650Ma a 450Ma) e também anatética - de dimensões menores, relacionados à fusão parcial e mobilização de material félsico (Pedrosa Soares *et al.* 2001b). Possui caráter gemológico e insere não menos que todos os corpos pegmatíticos com mineralizações de berilos encontrados no estado de Minas Gerais.

De maneira análoga, a área em questão é também compreendida pela Província Esmeraldífera de Minas Gerais, que se estende desde a região ao Norte de Rio Casca até o sul de Guanhões (Souza 1988). Dessa forma, o conhecimento geológico é de extrema importância para concluir os objetivos deste estudo, visto que a ocorrência das variedades gemológicas de berilo são controladas principalmente por critérios litológicos e estruturais.

2.1 ESTRATIGRAFIA

Foram cartografadas na quadrícula investigada rochas arqueanas a proterozoicas, com idades entre 3,2Ma e 1,8Ma. Afloram nesta área as rochas pertencentes ao Grupo Guanhões, correlato geocronologicamente dos complexos ortognáissicos Gouveia e Mantiqueira; unidades arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas; rochas paleoproterozoicas pertencentes à Suíte Borrachudos, Grupo Serra da Serpentina e rochas intrusivas Metabásicas. Todas as unidades supracitadas serão melhor descritas no decorrer deste subitem, afim de explicitar de maneira sucinta e sistemática a diversidade litológica presente na área de estudo.

2.1.1 Arqueano

Na região de estudo ocorrem dois grupos de rochas arqueanas, os complexos ortognáissicos do Mesoarqueano, representados pelas rochas do Grupo Guanhões e as rochas do Supergrupo Rio das Velhas; no caso da região, ainda afloram os grupos Nova Lima (Mesoarqueano) e Maquiné.

2.1.1.1 Grupo Guanhões

Trata-se de uma sequência arqueana ou proterozóica superior constituída principalmente por rochas supracrustais vulcânicas e sedimentares (Grossi-Sad *et al.* 1989,1990). As rochas de proveniência sedimentar são caracterizadas por xistos aluminosos, grafitosos e calciossilicáticos; quartzito; quartzito ferruginoso; formação ferrífera e manganésifera; mármore e gnaiss grauvaquiano. Já aquelas de origem vulcânica são dispostas como xisto ultramáfico.

Este Grupo é dividido atualmente em três formações: Formação Inferior (xistos verdes metabásicos e metaultrabásicos, xistos pelíticos - contendo lentes de itabirito - quartzito e formação manganésifera), Média (itabiritos, rocha calcissilicática, xisto carbonático, rocha carbonática, quartzitos e quartzito ferruginoso) e Superior (paragnaisse rico em intercalações anfibolíticas e, subordinadamente, quartzito e formação ferrífera). A Formação Superior aflora em grande parte da área investigada, expressando cerca de 55% da área total estudada, principalmente nas porções leste desta. Como supracitado, é constituída por gnaisses finamente bandados (metagrauvas) com intercalações de quartzito e quartzo-xisto, quartzito ferruginoso, anfibolito, formações ferríferas e rochas ultramáficas da ordem decimétrica a métrica.

2.1.1.2 Supergrupo Rio das Velhas Indiviso

Devido ao limitado grau de detalhe da campanha de mapeamento realizada, a pequena dimensão dos corpos mapeados e a comum mistura dos litotipos presentes, o Supergrupo Rio das Velhas foi cartografado como Supergrupo Rio das Velhas Indiviso. Pode-se dizer que esse grupo de rochas é caracterizado por uma sequência metavulcanossedimentar com grau metamórfico de fácies anfibolito, composta por rochas metaultramáficas e metamáficas, xistos máficos, *metacherts*, formações ferríferas bandadas, mármore, xistos e gnaisses metapelíticos, quartzitos e rochas calcissilicáticas (Grossi-Sad *et al.* 1990).

Sua ocorrência como Supergrupo Rio das Velhas Indiviso é limitada na porção sudoeste da área estudada, compondo cerca de 3% da área total. Foram ainda cartografados os grupos Nova Lima e Maquiné, na região sudeste da quadrícula, abrangendo aproximadamente 2% da mesma. O Grupo Nova Lima foi reconhecido individualmente na região, sendo descrito como xistos, metagrauvas, metamáficas, quartzitos ferruginosos e formações ferríferas, metaultramáficas e *metacherts*. O Grupo Maquiné é caracterizado na região por quartzitos, metaconglomerados e quartzo-mica-xistos, filitos e xistos subordinados.

2.1.2 Mesoproterozoico / Paleoproterozoico

As unidades associadas ao proterozoico evidenciadas na área estudada são principalmente compostas pela unidade paleoproterozóica de ortognaisses de assinatura alcalina pertencentes aos corpos Açucena e Garcia, pertencentes à Suíte Borrachudos. Atualmente a bibliografia mais aceita diz que esses gnaisses foram gerados durante um processo de abertura crustal, entre o paleozoico e o mesoproterozoico, onde foram depositados os sedimentos do Supergrupo Espinhaço. Também afloram na região rochas intrusivas metabásicas, geradas ao longo do proterozoico, além das formações ferríferas do Grupo Serra da Serpentina, também proterozóicas.

2.1.2.1 Suíte Borrachudos (Corpos Açucena e Garcia)

Trata-se da única litologia paleoproterozóica aflorante na área, composta por ortognaisses alcalinos dos corpos Açucena e Garcia pertencentes à Suíte Borrachudos. Esta Suíte foi inicialmente descrita por Dorr & Barbosa (1963) e associada a estágios orogenéticos tardios. Posteriormente, foi determinada por Herz (1970), Chemale Jr. (1987), e catalogadas nas campanhas de mapeamento da região de Barão de Cocais, nas folhas Coronel Fabriciano (Grossi Sad *et al.* 1990), Itabira, Ipatinga e Conceição do Mato Dentro.

São corpos rochosos interpretados como granitos do tipo-A, compostos por metagranitóides de granulação média a grossa, coloração cinza, variando entre cinza claro e cinza claro rosado, associadas geograficamente com o Complexo Mantiqueira e o Grupo Guanhães (Grossi-Sad *et al.* 1990). Possuem caráter metaluminoso e as feições texturais ígneas preservadas sugerem ortoderivação. Ocorrem geralmente deformados e apresentam foliação marcada pela biotita. Geralmente, a Suíte Borrachudos é diferenciada em relação aos gnaisses do Complexo Mantiqueira por intermédio da análise petrográfica, capaz de indicar as rochas do Corpo Açucena, por estas se apresentarem pouco deformadas, e, portanto, sem evidências de bandamento, mas bem orientados apresentando *ribbons* de quartzo (Oliveira & Leite 2000).

A Folha Ipatinga foi individualizada em duas fácies de acordo com Oliveira & Leite (2000), Porfírica e Equigranular. A Fácies Porfírica apresenta granulação fina a muito grossa e textura granoblástica. É comum a presença de bolsões de biotita responsáveis pelo aspecto manchado. Composta principalmente por quartzo, plagioclásio, K -feldspato, biotita e hornblenda, acessórios (titanita, allanita, monazita, fluorita, opacos, apatita, zircão), e secundários como carbonatos, clorita, argilominerais, hidróxidos de ferro, epidoto e micabranca. A Fácies Equigranular possui, predominantemente, granulação fina a média e textura granoblástica. As paragêneses principal e acessória são concordantes à Fácies Porfírica. Datações Pb/Pb da Suíte Borrachudos, são descritas na literatura, no Granito São Felix, na Folha Serro (1729 ± 14 Ma), no Granito Itauninha e na Folha Conceição do Mato Dentro (1595 ± 10 Ma) (Oliveira & Leite 2000).

A área de estudo é composta por rochas intrusivas graníticas pós-tectônicas distribuídas na porção centro-sul, onde aflora o Corpo Açucena (corpo plutônico, ígneo, caracterizado por biotita granito); e na região leste, encaixado nos litotipos do Grupo Guanhães, aflora o Corpo Garcia, de menor dimensão, caracterizado principalmente por biotita-(hornblenda), granito e ortognaisses. Ambos os corpos representam cerca de 40% da área total estudada. Ocorrem geralmente associadas a intrusões de rochas metabásicas, e, nessas regiões os granitos apresentam variação de cor, que se torna avermelhada, podendo ocorrer capeados por laterita (Oliveira & Leite 2000).

2.1.2.2 Grupo Serra da Serpentina (Unidade Itabirítica)

Aflorante na porção leste da quadrícula estudada, este Grupo foi subdividido em unidades informais: Unidade Quartizítica, Unidade Itabirítica e Unidade Filítica (Dossin 1985). Alguns autores apresentam estas rochas como cronocorrelatas do Supergrupo Minas, no Quadrilátero Ferrífero. Contudo, Almeida-Abreu & Pflug (1994), relaciona estas rochas como resultantes da abertura da Bacia Espinhaço”. Na região de estudo se observam as rochas pertencentes à Unidade Itabirítica, caracterizada por itabiritos com intercalações quartzíticas e de clorita xistos (menos frequentes). São corpos alongados, extensos, com direção NE e estão geograficamente associados às rochas do Complexo Guanhães. Estes corpos representam menos de 1% da área total investigada.

2.1.2.3 Grupo de Rochas Metabásicas

Comumente associadas às rochas da Suíte Borrachudos, as rochas metabásicas aflorantes na região são caracterizadas por rochas intrusivas, metagabros, metadiabásios, anfibolitos e metabasaltos datados do Neoproterozoico. Encontram-se dispostos em corpos alongados na direção NW, na porção centro sul da área estudada, e também no limite sudeste, associada ao Corpo Açucena e ao Complexo Guanhães, respectivamente. De acordo com Silva 2000, ainda que não tenham sido realizados estudos mais detalhados sobre a petrografia dessas rochas, para melhor caracterização, é possível afirmar que estas rochas possuem dimensões variadas; ocorrem como corpos maiores próximos às serras da Conceição e do Machado, ao sul da área de estudo, bem como estão presentes como corpos de menor tamanho, desde a região abrangida na Folha de Itabira até os contrafortes da Serra do Espinhaço, relativamente preservadas de deformação tangencial, possivelmente, Espinhaço. Assim como as rochas do Grupo Serra da Serpentina. Por serem corpos alongados e de tamanho reduzido, representam menos de 1% da região abrangida neste estudo.

2.2 EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA

O embasamento da Faixa Araçuaí, de origem paleoarqueana, está associado à formação de crosta siálica há aproximadamente 3.300Ma, caracterizada pelo Complexo Barbacena e equivalentes (Machado & Noce 1993). Entre 3.100 Ma e 2.770Ma, rochas arqueanas do tipo *greenstone*, como o

Supergrupo Rio das Velhas, foram depositadas bem como os depósitos ferríferos do Grupo Guanhães, (Machado & Noce 1993, Teixeira 1993, Grossi-Sad *et al.* 1990a). A ocorrência de expressivo magmatismo cálcio-alcálico na região do Quadrilátero Ferrífero (2.780 Ma), infere ambiente de margem continental ativa, indicando colisão de micropalcos envolvendo núcleos síalicos, crosta oceânica e arcos vulcânicos. A ocorrência de um magmatismo de arco magmático no final do Paleoproterozoico (2000 Ma) – granitóides de assinatura cálcio-alcálica a alcálica, possivelmente relacionados aos depósitos metavulcanossedimentares do tipo flysch da Formação Sabará (Grupo Piracicaba) (Dorr 1969), e correlatos (Noce 1995) – caracterizado por sugerir o estabelecimento de um arco magmático seguido de colisão continental (Teixeira 1985). Seguidamente, no fim do Evento Transamazônico (2000 Ma), o embasamento da Faixa Araçuaí se comportou como uma plataforma que sofreu processos de rifteamento acompanhado de sedimentação e vulcanismo durante o Mesoproterozoico e o Neoproterozoico.

Nos primórdios da abertura do rifte Espinhaço (1750-1700Ma), a partir do desenvolvimento de margem passiva com formação de crosta oceânica e orogênese, surgiram os granitoides tipo-A da Suíte Borrachudos, por volta de 1.7 Ga (Pedrosa Soares *et al.* 1994). Tal processo evoluiu, permitindo a sedimentação do Supergrupo Espinhaço durante a fase pós-rifte (Mesoproterozoico). Seguidamente, de acordo com Pedrosa-Soares *et al.* (1992a, b, 1998b), durante o Ciclo Brasileiro, no Neoproterozoico, o Cinturão Araçuaí Oeste Congo se consolidou com geração de crosta oceânica, sedimentação, metamorfismo e posterior deformação que retrabalhou toda a região, inclusive as rochas do embasamento. Este orógeno se manteve confinado nos crátons Araçuaí e Congo durante sua evolução.

No início do Neoproterozoico, instalou-se o rift Araçuaí (1000 Ma), que evoluiu para uma margem passiva. Os grupos Macaúbas, Rio Doce, Dom Silvério, etc. exemplificam o preenchimento do *rift*-margem passiva Araçuaí (Pedrosa-Soares *et al.* 2001a). Por conseguinte, o Evento Brasileiro (650-500 Ma) individualizou o Cráton do São Francisco e suas faixas móveis (Almeida 1977). Nesse mesmo período, observa-se um plutonismo granítico na Faixa Araçuaí, datado entre 600 e 520 Ma (Noce *et al.* 2000).

2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL

De maneira geral, a região em questão foi deformada por dois principais eventos tectônicos: Ciclo Orogênico Transamazônico e o Ciclo Brasileiro. O primeiro possui caráter regional, sendo responsável pelo arranjo regional da foliação e bandamento gnáissico das rochas arqueanas da área de estudo, pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas e ao Grupo Guanhães, assim como está associada, secundariamente, à intrusão dos granitos da Suíte Borrachudos há aproximadamente 1,7 Ga. De acordo

com Dussin (1994), o Evento Transamazônico é caracterizado, na região oeste da Serra do Espinhaço Meridional, por uma fase precoce de tectônica tangencial, vergindo para E, seguido de uma fase de falhas de empurrões sub-horizontais E/W com vergência para Sul. Silva (1997) caracteriza o Evento Transamazônico na folha Santa Maria do Suaçuí (Projeto Leste, Etapa I), a leste do Supergrupo Espinhaço, por um transporte tectônico de norte para sul.

Pode-se afirmar ainda que ocorreram dois eventos extensionais entre o Transamazônico e o Brasileiro,;um responsável pelo *rift* Espinhaço e outro responsável pelo *rift* Araçuaí.

Já o segundo evento, mais recente e de caráter local, está relacionado a deformações compressionais e tangenciais, exemplificada pela zona de cisalhamento Dom Silvério (Silva 2000). O Brasileiro foi descrito por Marshak & Alkmim (1989), Uhlein & Trompete (1992), Pedrosa Soares *et al.* (1992) Dussin (1994) e Endo (1997). Trata-se de um evento orogênico associado à cavalgamentos N/S causados principalmente por mecanismos de cisalhamento do tipo simples com vergência para W, confirmadas pela estruturação da Faixa Araçuaí que, por sua vez, apresenta dobras assimétricas separadas por zonas de cisalhamento e com mesmo sentido de transporte tectônico.

CAPÍTULO 3

BERILOS

Minas Gerais é um dos principais estados produtores de minerais-gema do Brasil, é possuidor de umas das maiores províncias gemológicas do mundo, a Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB) (Paiva 1946). Acredita-se que somente o estado de Minas Gerais é responsável por aproximadamente 25% da produção gemológica mundial, produzindo minerais-gemas para comercialização e amostras para colecionadores e museus (Favacho 2001; Liccardo 2007). Nesse contexto, a região de Itabira é famoso pelo seu potencial gemológico, principalmente associado à ocorrência do berilo em suas variedades gemológicas (Figura 3.1). De acordo com o Sumário Mineral 2012 do DNPM, o município de Itabira, responde por mais de 90% da produção nacional de gemas berilíferas.

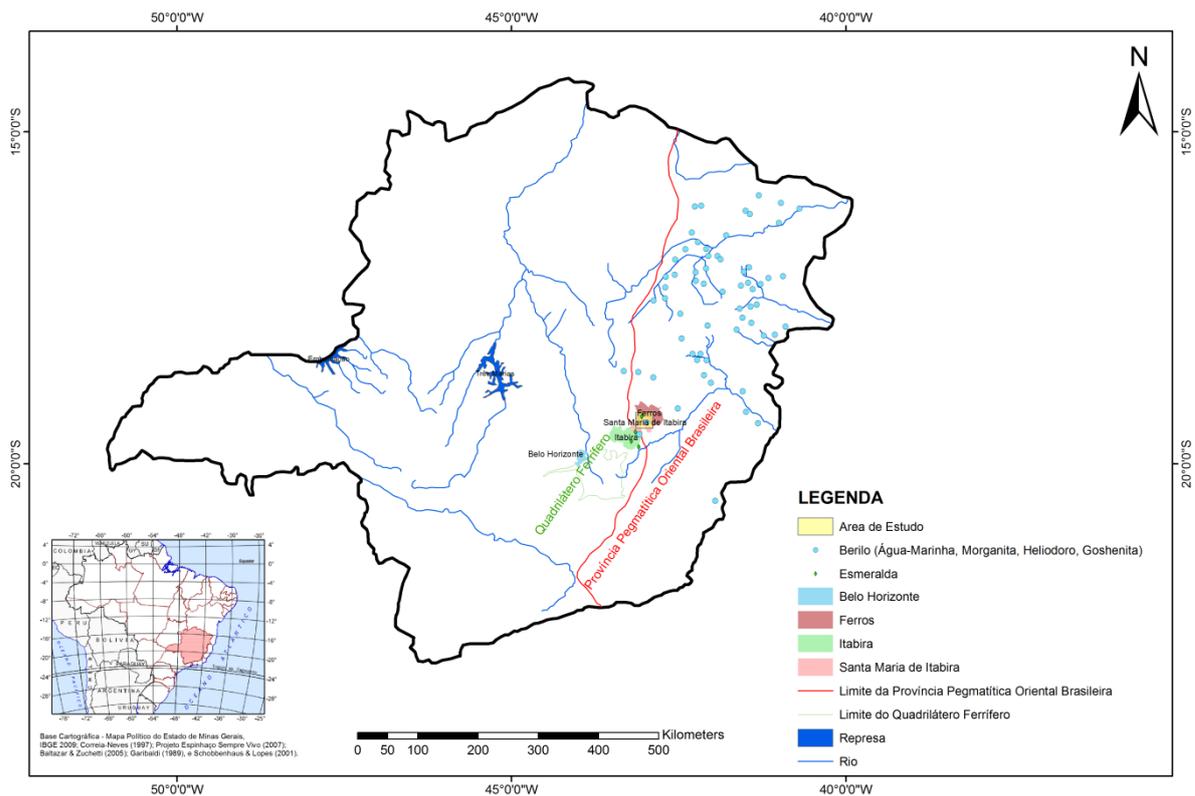


Figura 3.1. Ocorrência de gemas berilíferas (água-marinha, morganita, heliodoro, goshenita e esmeralda) no estado de Minas Gerais.

Parte integrante da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Figura 3.2), a área estudada está situada na sua porção ocidental. Trata-se de uma região mundialmente reconhecida pelas jazidas de berilo gemológicos: esmeralda e água-marinha, principalmente. Dessa forma, o capítulo 3 deste estudo

visa explicar acerca da ocorrência destas gemas, sua retrospectiva histórica, suas gêneses e fatores controladores relacionados à sua mineralização.

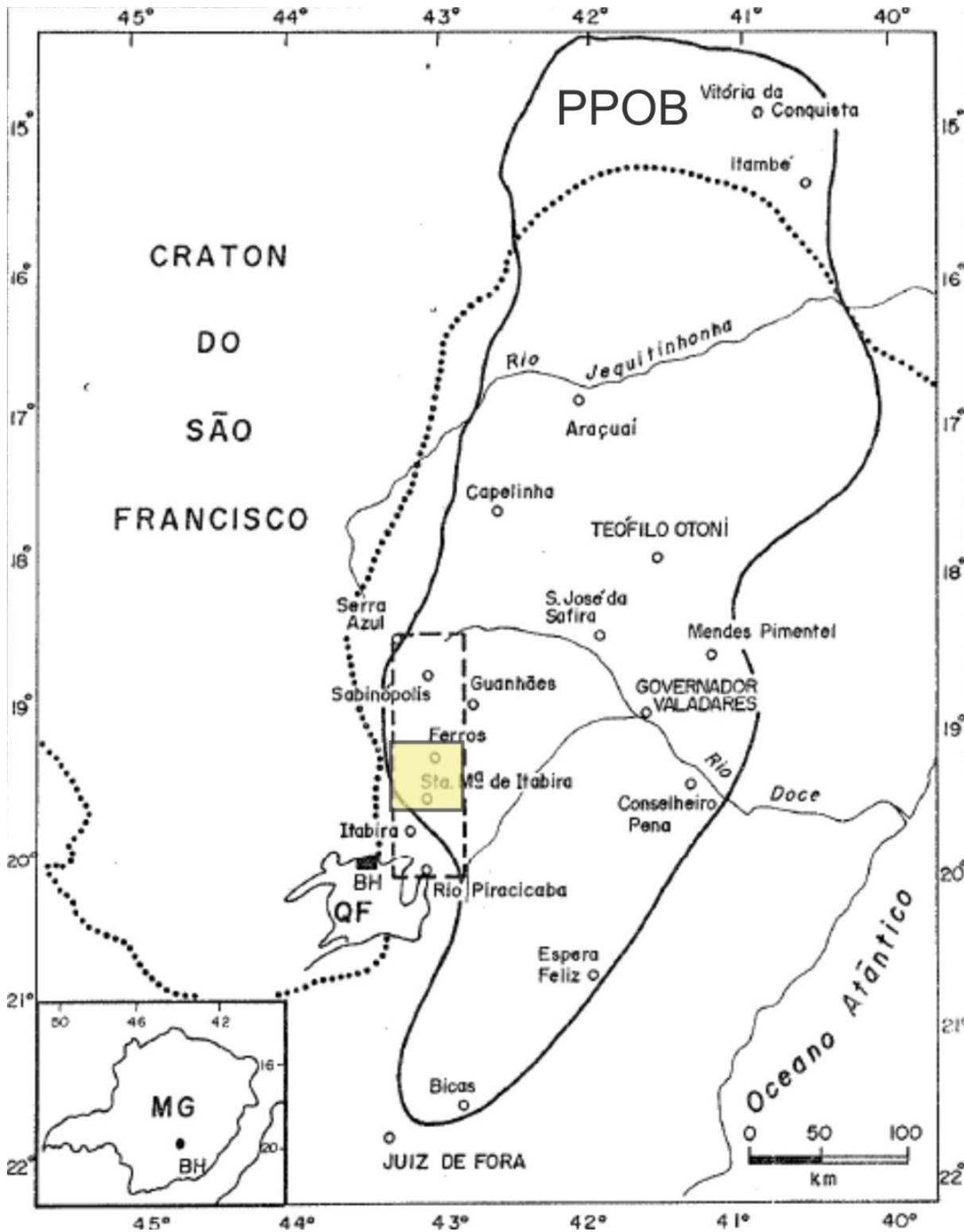


Figura 3.2. Província Pegmatítica Oriental do Brasil e localização da região de estudo de estudo neste contexto (modificado de Marciano 1995).

3.1 BERILO

O nome do mineral berilo, em latim beryllus, associa-se ao tom mais comum do mineral, o verde-claro ou verde-claro-azulado. O berilo - $[\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})] \cdot x \text{H}_2\text{O}$ (e “x” entre 0 e 2) - consiste em um importante silicato com grande variabilidade de cor, algumas muito raras com tons que variam do incolor ao vermelho. Trata-se de um mineral caracterizado por brilho vítreo, hábito prismático alongado à tabular, peso específico 2,72 (+0,18, - 0,05), clivagem basal em uma direção (quase nunca visível), dureza 7,5 – 8, birrefringência 0,005 - 0,009 e possui caráter ótico uniaxial negativo.

É também o minério do metal berílio (Be), com aplicação na confecção de escudos de calor, acelerômetros, giroscópios, plataformas estáveis, sistemas de orientações, etc (Sauer 1982, Klein & Hurlbut Jr. 1993, Schumann 1995). Este mineral ocorre em uma gama de locais e ambientes, de modo que o berilo de valor gemológico está geralmente associado a pegmatitos graníticos, e menos frequentemente a depósitos secundários (eluviões e aluviões).

Ressalta-se que a palavra berilo, quando utilizada por si só, não faz alusão a qualquer uma de suas variações gemológicas (Figura 3.3). Estas são classificadas principalmente de acordo com sua coloração e possuem termos gemológicos respectivos. Dessa maneira, a esmeralda possui coloração verde-grama; água-marinha varia de um azul intenso a azul-esverdeado; heliodoro, ou berilo dourado possui coloração amarelo-limão a amarelo-dourado; morganita é encontrada nos tons rosa-chá a rosa-salmão; bixbita é caracterizada por um vermelho groselha a um vermelho-salmão e, por fim, a goshenita, que pode ser incolor ou branca (Sauer 1982, Schumann 1995).

A vasta gama de cores associada às gemas do berilo se dão principalmente pela presença íons de metais de transição ou impurezas na estrutura cristalina no mesmo, esses elementos, denominados cromóforos e/ou respectivos estados de valência na estrutura cristalina deste mineral. Nesse sentido, as esmeraldas, de tonalidade verde grama característica estão relacionadas à presença de Cr^{2+} , V^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} . Já a água-marinha, tem sua tonalidade esverdeada associada à presença de Fe^{3+} e os tons azuis conferidas pela presença de Fe^{2+} , e de acordo com Brown (1993) e Schumann (1995), a presença de Ba^{2+} no sistema pode ocasionar a ocorrência de minerais com coloração fortemente azulada. O heliodo, por sua vez está associado além da presença de Fe^{2+} , a ocorrência de Mn e Ti. A morganita, além do Mg e Fe, o Li também é característica do sua coloração rósea e, a bixbita, está comumente relacionada a presença de Mn, Ti, Li, Nb. Por fim, a goshenita, característica por sua coloração incolor não possui qualquer metal de transição associado a sua cor, mas pode apresentar Na e Li na sua estrutura cristalina (Correia Neves *et al.* 1986, Schwarz 1987, Brown 1993, Schumann 1995).

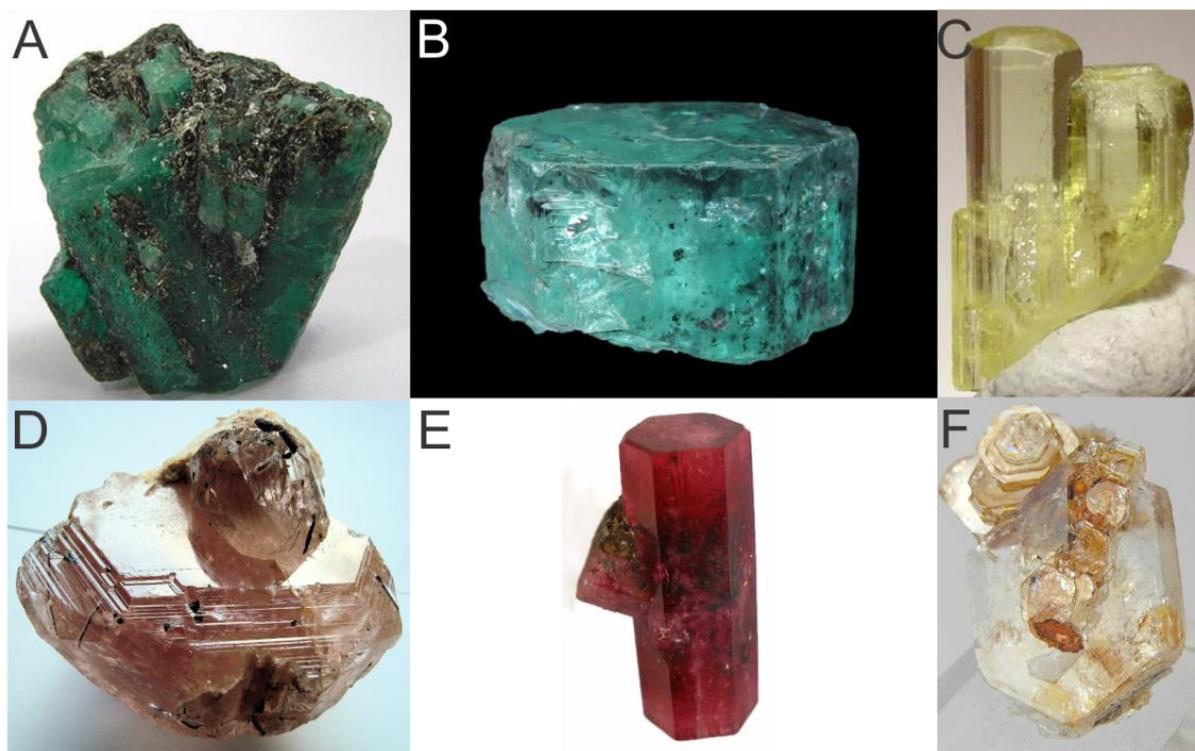


Figura 3.3. A. Esmeralda, Itabira – MG; B. Água-Marinha, Mina de Piteiras, Nova Era – MG; C. Heliodoro, MG; D. Morganita, Galiléia – MG; E. Bixbita, Utah – USA; F. Goshenita, Conselheiro Pena – MG (Mindat 2017)

Sua aplicação gemológica é conhecida desde a Antiguidade pelos povos egípcios e outras civilizações antigas. Sabe-se que o mercado mais antigo conhecido, a Babilônia, já comercializava esmeraldas há 4000a.C. As variações gemológicas do berilo eram utilizadas como talismãs por marinheiros, e conhecidas por seus dons, acreditava-se que estas possuíam poder curador, protetor da vida conjugal e contra envenenamentos, além de certos dons proféticos, podendo ser usadas também para descobrir pessoas de má fé e ladrões. Suas primeiras descrições mineralógicas registradas decorrem de 1772 e 1801 (Castañeda *et al.* 2001).

3.1.1 Esmeralda

Considerada a variedade mais nobre do berilo, a esmeralda ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) é caracterizada pela sua coloração verde-grama, dependente principalmente da presença e teor de elementos como cromo, vanádio que substituem o alumínio na sua estrutura cristalina (Figura 3.4). Pode-se dizer que a presença de outros elementos como ferro e níquel, confere a essa gema as tonalidades azuladas ou amareladas (Schwarz & Schmetzer 2001). No estado de Minas Gerais, a ocorrência de esmeralda está concentrada em uma mesma região, caracterizada pela presença de importantes jazidas como a Mina Belmont (Itabira), Garimpo da Capoeirana e Mina de Piteiras (Nova Era) bem como outras ocorrências em Santa Maria de Itabira, Ferros, Itabira de Ferros e Cubas. Nesse contexto, toda a região

desde o Norte de Rio Casca até o Sul de Guanhães é denominada Província Esmeraldífera de Minas Gerais (PEMG), localizada no extremo Sudeste do Cráton São Francisco (Figura 3.5).



Figura 3.4. Esmeralda lapidada com 0,5cm e 0,7cm de dimensão.

As mineralizações de esmeralda na área estudada, que por sua vez se insere na PEMG, estão associadas, em sua maioria, à presença de uma sequência vulcanossedimentar (xistos metapelíticos, xistos de metaultramáficos, anfibolitos, veios de quartzo e veios pegmatoides) em contato com gnaisses de composição granítica (Suíte Borrachudos). Assim, as mineralizações sempre acontecem em zonas próximas ao contato entre os xistos metaultramáficos e os granitoides, estéreis em esmeralda e, portanto, são consideradas do Tipo Clássico, em que a presença de pegmatitos cortando rochas metaultramáficas, na região de estudo caracterizada pelo flogopita xisto, possibilita mineralização a partir da interação entre fluidos graníticos e rochas ricas em elementos cromóforos (Souza *et al.* 1987, Souza 1988, César-Mendes 2000).

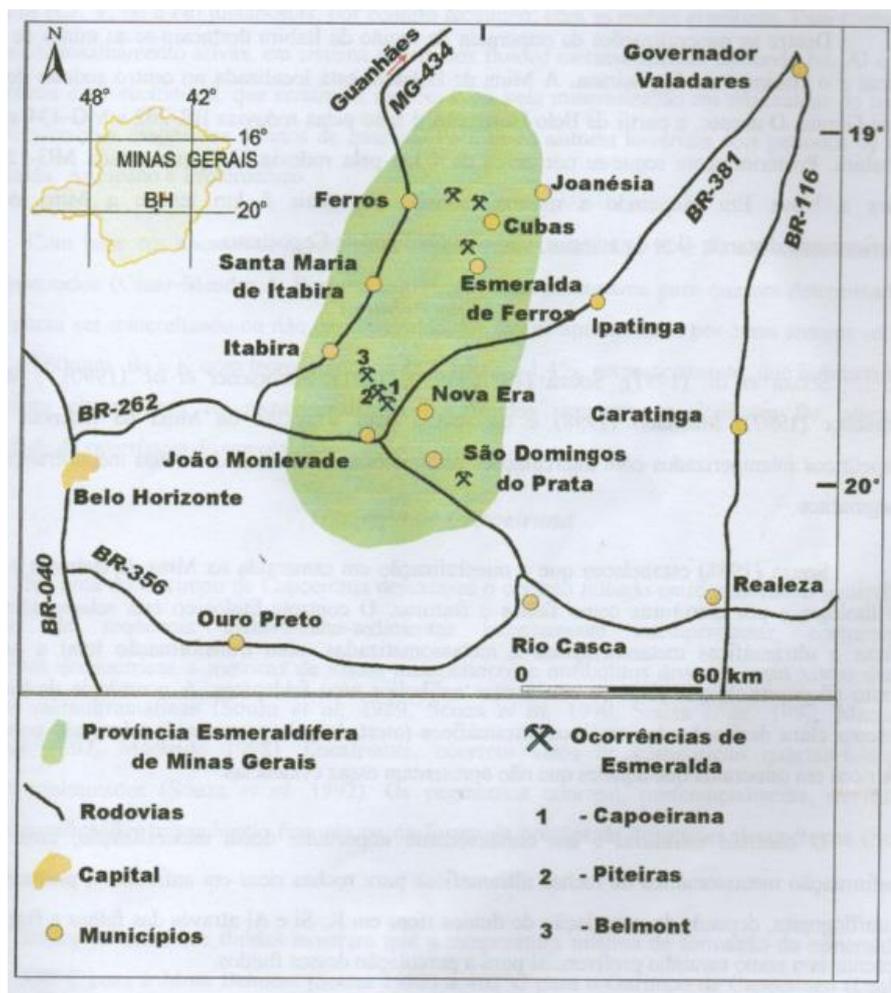


Figura 3.5. Província Esmeraldífera de Minas Gerais (modificado de César-Mendes 2000).

Os fatores controladores da gênese da esmeralda agregam os seguintes critérios: litológico, estrutural e ocorrência de fluidização. Assim, faz-se necessária a presença de rochas ultramáficas ricas em Cr, V, Mg em contato com rochas félsicas ricas em Be e álcalis (Franz *et al.* 1996). A interação entre esses dois litotipos deve ocorrer, seja ela intrusiva ou por falhas. Nesse caso, a presença de zonas de cisalhamentos, falhas, fraturas ou qualquer descontinuidade aumenta as possibilidades de interação entre os elementos essenciais à gênese da esmeralda. Trata-se de um possível caminho de interação entre fluidos residuais da cristalização dos pegmatitos que possibilitam o contato entre a rocha-fluido. A presença desses fluidos mineralizantes pegmatíticos ou hidrotermais nas rochas encaixante é essencial para que a mineralização ocorra (Giuliani & Couto 1988a, Giuliani *et al.* 1990, Schwarz & Giuliani 2001). De maneira que esta pode ocorrer na própria rocha encaixante ou no pegmatito, a depender da permeabilidade das rochas em questão e a reatividade química são os principais fatores influenciadores.

Na maioria dos casos, a mineralização de esmeralda se dá na encaixante (rochas ultramáficas), visto que o Cr é muito pouco móvel nas condições de hidrotermais comuns em depósitos pegmatíticos, e o Be, por sua vez, é transportado com mais facilidade para as rochas ricas em elementos cromóforos (Lauris *et al.* 1996). Assim, o comportamento geoquímico do berilo e dos outros minerais associados a essa gênese depende também das condições genéticas dos fluidos mineralizantes, sua disposição estrutural e da composição da rocha hospedeira (Newman Fernández 2004).

3.1.2 Água-Marinha

Bem como outras gemas, a mineração de águas marinhas foi em muito fomentada a partir da chegada dos imigrantes, na segunda metade do século XX e é considerada atualmente a gema mais característica do Brasil, uma vez que as amostras mais valiosas já encontradas são de origem brasileira (Figura 3.6). De acordo com Proctor (1984), a descobertas históricas de águas marinhas nesse período foram de grande importância para a valorização desta variedade gemológica no Brasil. Esta variedade gemológica não é restrita a Província Pegmatítica Oriental do Brasil, mas também ocorre nos estados da Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte (Província Nordeste), e de ocorrências no Tocantins e Goiás.



Figura 3.6. Águas-marinhas lapidadas, tamanhos variam entre 0,4 e 0,8cm.

Em Minas Gerais, destacam-se as descobertas da água-marinha de Papamel descoberta em 1910, no vale do rio Marambaia, com aproximadamente 110kg e 50cm de comprimento, e da Marta

Rocha, descoberta em 1954, encontrada na mesma região, na mina Mucuri, com cerca de 34kg e mais de 60% de limpidez (Proctor 1984). O berilo pode cristalizar em cristais de vários tamanhos desde milimétricos a métricos. Os maiores cristais registrados no Brasil provém da região de Governador Valadares. Delaney (1996) menciona um cristal encontrado em 1950, com 105t, próximo a Galiléia. Geralmente, cristais de grande porte, como os supracitados, são mais comuns em pegmatitos e possuem aplicação industrial, em alguns casos, possuem valor gemológico como o berilo Marta Rocha, uma das peças lapidadas mais famosas do mundo, bem como IV Centenário, descoberte em 1964 na mina de Pedroso; Estrela D'Alva, em 1967, na mina Pioneira, no Vale Três Barras; Tiradentes ou Cachacinha no ano de 1955 em Medina (Figura 3.7) e Lucia, no mesmo ano na região de Governador Valadares (Proctor, 1984, Garibaldi 1994).



Figura 3.7. Água-marinha Tiradentes, 65kg, 55cm de altura e aproximadamente 40cm de diâmetro (Infojoia 2017).

De maneira geral, esta variedade do berilo, tem seu nome derivado do latim *agua marinus*, que significa água do mar, de acordo com sua cor mais comum, a esverdeada e de menor interesse geológico. A água-marinha pode também ocorrer nas cores, azul, azul-esverdeado, verde-amarelado e verde-azulado e azul-escuro, associadas aos diferentes teores de Fe (ainda não há uma concordância científica acerca da influencia do ferro na cor do berilo, seja pela sua valência e ou número de coordenação). Já a cor azul escura, que se dá pela presença de bário no sistema. Esta variação pode ser encontrada na mina Maxixe em Araçuáí, e por isso, também é conhecida popularmente como berilo Maxixe, trata-se de amostras que podem perder a intensidade de sua cor se expostas ao sol por tempo prolongado. É pratica comum o tratamento térmico em águas marinhas para melhoria da cor. Normalmente, as amostras de tons esverdeados são submetidas a temperaturas de 400 C e 500 C para mudança de coloração de verde para azul (Castañeda *et al.* 2001).

Na região de estudo, os pegmatitos produtores de jazidas estão dispostos sempre em contato ou próximos aos ortognaisses da Suíte Borrachudos. Os berilos de qualidade gemológica ocorrem comumente associados a pegmatitos de tamanhos variados e de composição granítica, essencialmente constituídos por feldspato, quartzo e mica, normalmente zonados e possivelmente dobrados. Sua gênese pode estar relacionada à formação dos pegmatitos sensu-stricto gerados no contexto da segregação magmática dos granitos Borrachudos (Oliveira 2002). De acordo com Cerný (1991), essa variedade de pegmatito granítico com elementos raros é proveniente de uma fusão granítica residual rica em voláteis e muito hidratada que se cristalizaram em ambientes de pressão variável e pouca conexão com as encaixantes.

O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, inserido na área estudada é constituído por pegmatitos com dimensões entre 50-100m de comprimento e 5-10m de espessura, comumente zonados. Trata-se de corpos em sua maioria tabulares, de atitudes discordantes das encaixantes e com mineralogia composta por: micas (muscovita, biotita) quartzo, monazita, fluorita, gemas de berilo (água-marinha e heliodoro), topázio, granadas, além de minerais do grupo nióbio-tantalatos (ferrocolumbita-tantalita). Destacam-se os corpos pegmatíticos componentes do Campo Pegmatítico de Santa Maria de Itabira – Ferros, importantes devido à mineralização de águas marinhas de coloração azul forte (Marciano 1995). São corpos pegmatitos encaixados majoritariamente nas rochas do Grupo Guanhões e dispostos de maneira discordante, casualmente associados a rochas do corpo Açucena - Suíte Borrachudos, onde ocorre, por exemplo, o Pegmatito do Tatu (Castañeda *et al.* 2001).

Horta, L.F.C. 2017. Estudo Geológico e Geofísico da região de Santa Maria de Itabira e Ferros, Minas Gerais...

.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS GEOFÍSICOS

Os métodos geofísicos aplicam os princípios físicos para o estudo da Terra e, dessa forma, a pesquisa geofísica do interior da Terra utiliza-se de medidas obtidas em superfície ou próximo a ela. Tais medidas correspondem à variação interna das propriedades físicas da crosta terrestre, vertical e lateralmente (Kearey *et al.* 2009).

Dessa forma, o uso da geofísica é fundamental para o aprimoramento de pesquisas geológicas em superfície e subsuperfície, podendo ser empregada de forma ampla (Tabela 4.1). Variadas propriedades físicas podem indicar, segundo Gouvea & Costa e Silva (1995), o corpo rochoso estudado e sua encaixante, assim como as interfaces de estruturas favoráveis a concentração do material de interesse.

Além disso, os métodos geofísicos são frequentemente utilizados, de maneira integrada, para evitar os riscos de interpretação ambígua dos dados adquiridos. Assim, a partir do desenvolvimento de um trabalho sistemático e integrado, os conhecimentos geofísicos tendem a aperfeiçoar ao máximo as campanhas de exploração mineral, delimitando a área a ser investigada e minimizando os custos da pesquisa (Kearey *et al.* 2009).

Tabela 4.1. Métodos geofísicos correlacionados às propriedades físicas medidas analisadas (modificado de Kearey *et al.* 2009).

Método	Parâmetro Medido	Propriedades Físicas Operativas
Sísmico	Tempos de percurso de ondas sísmicas refletidas e refratadas	Densidade e módulos elásticos, os quais determinam a velocidade de propagação de ondas sísmicas
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnéticos Elétricos	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Susceptibilidade magnética e remanência
Resistividade	Resistência da Terra	Condutividade elétrica
Polarização Induzida	Voltagens de polarização ou resistência do solo dependem da frequência	Capacidade elétrica
Potencial Espontâneo	Potenciais elétricos	Condutividade elétrica
Eletromagnético	Resposta às Radiações eletromagnéticas	Condutividade e indutância elétrica
Radar	Tempos de percurso de pulsos de radar refletidos	Constante dielétrica

Assim, serão apresentados no decorrer deste capítulo, os fundamentos teóricos mais importantes associados ao método magnetométrico e radiométrico que se fazem necessários para pleno entendimento das discussões apresentadas. Para uma revisão mais aprofundada, recomendam-se as seguintes referências bibliográficas: Telford *et al.* (1990), Kearey *et al.* (2009), Dentith & Mudge. (2014).

4.1 MAGNETOMETRIA

O método magnetométrico baseia-se no estudo das variações do campo magnético da Terra, que por sua vez estão intimamente associados às propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície e sua distribuição ao longo da crosta terrestre. A magnetização de uma rocha acontece de acordo com a sua susceptibilidade magnética, que varia de acordo com a quantidade presente e distribuição de minerais magnéticos, tais como a pirrotita, magnetita e ilmenita, responsáveis por produzir distorções locais no campo magnético capazes de fornecer informações sobre as naturezas das rochas em subsuperfície (Kearey *et al.* 2009).

Trata-se de um método com ampla utilização, uma vez que podem ser aerolevantados, submarinos ou ainda terrestres. As facilidades de obtenção e rapidez de levantamentos aéreos, por exemplo, fazem com que esse método seja largamente utilizado, uma vez que possibilita o levantamento de informações essenciais para melhor conhecimento geológico da área investigada, como contatos litológicos, feições estruturais e em determinados casos, uma possível delimitação da geometria aproximada de corpos mineralizados em subsuperfície.

De maneira geral, pode-se dizer que a compreensão das propriedades magnéticas dos materiais é primordial para uma utilização bem sucedida da magnetometria como método de estudo. Conforme Kearey *et al.* (2009), todas as substâncias são magnéticas em uma escala atômica, e podem ser classificadas como diamagnéticas, paramagnéticas e ferromagnéticas, a depender da intensidade da sua magnetização, que pode variar de acordo com o *spin* e com a trajetória orbital dos elétrons ao redor do núcleo dos átomos.

Materiais diamagnéticos, quando submetidos a um campo magnético, apresentam baixa magnetização de sentido contrário ao campo magnético e, portanto, são repelidos. Trata-se de substâncias de baixa susceptibilidade magnética, o que explica sua fraca magnetização e, uma vez que são repelidas pelo campo magnético, apresentam susceptibilidade negativa. São exemplos de materiais diamagnéticos: quartzo, feldspato, anidrita, grafita e mármore.

Substâncias paramagnéticas apresentam baixa magnetização devido à sua baixa susceptibilidade magnética. Mas, uma vez inseridas em um campo magnético, possuem o mesmo

sentido deste, o que lhes confere uma susceptibilidade positiva. Ressaltam-se os seguintes materiais paramagnéticos: biotita, dolomita, gnaiss, pirita, piroxênio, olivina e condutores metálicos.

Já as substâncias ferromagnéticas possuem intensa susceptibilidade magnética positiva, o que resulta em uma forte magnetização no mesmo sentido do campo magnético e, por isso, são capazes de gerar anomalias magnéticas. Diferentemente dos materiais diamagnéticos e paramagnéticos, que possuem magnetização constante, a magnetização dos materiais ferromagnéticos depende da intensidade do campo magnético externo. Além disso, pontua-se que a partir de uma determinada temperatura limite, denominada temperatura de Curie, o material perde sua característica ferromagnética e passa a se comportar como paramagnético. Assim, rochas em profundidade podem perder sua magnetização original em função das altas condições de temperatura. São materiais ferromagnéticos: magnetita, pirrotita, titanomagnetita e maghemita, ou hematita- γ .

De maneira geral, observam-se duas formas de magnetização das rochas: induzida e remanescente. A primeira é resultado do campo atual da Terra e, a segunda, estudada por intermédio do paleomagnetismo, que é adquirida ao longo da história geológica da rocha quando esta se encontra exposta em um campo diferente do atual (Kearey *et al.* 2009). A interação dos dois tipos de magnetização pode resultar em interpretações errôneas dos valores adquiridos, quando os dois tipos de magnetização estão presentes (Telford *et al.* 1990).

A magnetização das rochas está intrinsecamente relacionada ao campo magnético atuante e à susceptibilidade magnética das mesmas e, por isso, varia de acordo com a quantidade de materiais e/ou minerais ferromagnéticos, sua quantidade, e tamanho relativo dos grãos e sua distribuição nas rochas. De maneira análoga, minerais como magnetita, ilmenita e pirrotita são os principais responsáveis pelas anomalias positivas identificadas pelo método magnetométrico, uma vez que possuem maior susceptibilidade magnética. Logo, as rochas com maior susceptibilidade magnética são aquelas com maior quantidade de minerais ferromagnéticos, e a intensidade da resposta depende do tamanho dos grãos, da quantidade destes e dos arranjos geométricos do corpo rochoso.

Assim, pode-se dizer que as rochas ígneas básicas exibem altos valores de susceptibilidade magnética, enquanto as ígneas ácidas apresentam valores menores. As rochas sedimentares, por sua vez, apresentam valores muito inferiores de susceptibilidade magnética, com exceção das formações ferríferas bandadas. Rochas metamórficas podem produzir relevos magnéticos suaves, moderados e até elevados, que variam de acordo com o protólito e das alterações resultantes do metamorfismo. Diques, soleiras e corpos de minério de magnetita estão comumente associados a intensas anomalias magnéticas (Figura 4.1) (Thomas 2001, Telford *et al.* 1990).

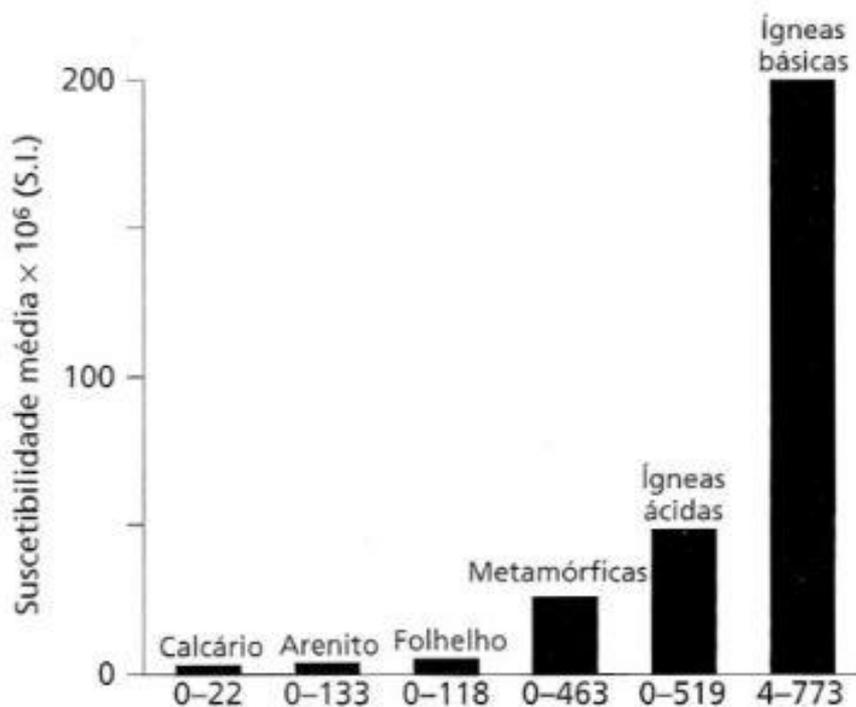


Figura 4.1. Histograma representativo dos valores médios de susceptibilidade dos diferentes tipos litológicos mais abundantes (modificado de Kearey *et al.* 2009).

Mudanças litológicas, variação na espessura dos corpos magnéticos, zonas de cisalhamento, falhas, dobras e variação no relevo também podem resultar em anomalias magnéticas, o que confere grande volume de informações observadas a partir da análise qualitativa dos mapas de campo magnético residual e regional (Telford *et al.* 1990).

O método magnetométrico está sujeito à interferência de efeitos negativos ou ruídos produzidos pelos campos magnéticos, como as variações diurnas, que geram flutuações magnéticas com período de 24 horas (causadas pelo movimento da ionosfera devido ao seu aquecimento no lado exposto ao Sol e resfriamento no seu lado oposto), e às tempestades magnéticas (associadas às emissões intensas de plasma solar e à sua interação com o campo principal da Terra) que são tanto aperiódicas como periódicas. Também são observados efeitos de outras naturezas no campo geomagnético, como por exemplo, aqueles relacionados às variações na amplitude, direção, intensidade, inclinação e declinação do campo magnético.

Dessa forma, com o objetivo de eliminar ou amenizar esse comportamento adverso, adotou-se o método de cálculo da fórmula do Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF–*International Geomagnetic Reference Field*), que consiste na representação teórica não perturbada do

campo magnético terrestre, para um dado intervalo de tempo e em algum ponto específico da superfície (Kearey *et al.* 2009).

Concomitantemente, o processamento de dados magnéticos aborda técnicas de filtragem capazes de separar os sinais produzidos pela fonte do levantamento daqueles produzidos pelas fontes indesejáveis (ruído). A correção desses fatores resulta na apresentação dos dados de campo anômalo.

A partir da transformada de Fourier e da interrelação de frequência e profundidade, é possível observar as diferentes características de uma região em estudo. Dessa forma, as filtrações são de extrema importância para a funcionalidade dos métodos potenciais, podendo ser aplicadas individualmente ou em associação com outros filtros e ferramentas, de acordo com os objetivos da investigação. Os filtros de frequência (passa baixa, passa alta) retiram altas frequências a fim de evidenciar informações de fontes profundas. No caso do filtro passa baixa, para anomalias rasas, aplica-se o filtro de passa alta. Filtros de continuação (para cima e para baixo) filtram altas frequências, retirando anomalias rasas na continuação para cima e também é capaz de elaborar respostas para anomalias superficiais, por meio da continuação para baixo. Já os filtros de derivada se dividem em Gradiente Vertical (evidencia fontes superficiais), Gradiente Horizontal em X (evidencia estruturas N-S) e Gradiente Horizontal em Y (Evidencia as estruturas E-W). Quando Residual, remove possíveis anomalias regionais.

Ressalta-se a aplicação da Redução ao Polo e a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), que são utilizadas em dados de caráter dipolar que atuam de maneira a concentrar as anomalias simetricamente em relação à fonte, transformando os valores em medidas proporcionais à força, evidenciando grandezas horizontais e verticais (Telford *et al.* 1990, Kearey *et al.* 2009).

Pode-se afirmar que uma investigação mais complexa acerca da profundidade de fontes magnéticas deriva do método de Deconvolução de Euler, uma técnica de inversão de dados de métodos potenciais desenvolvidos a partir dos princípios da equação homogênea de Euler por Thompson (1982), a partir de estudos pioneiros que correlacionaram a distribuição de susceptibilidade magnética das fontes geradoras das anomalias magnéticas com sua geometria em subsuperfície (Telford *et al.* 1990).

A Deconvolução de Euler é uma técnica obtida pelo processo de inversão dos mínimos quadrados calculados a partir de equações de Euler, a partir dos valores do campo anômalo e do índice estrutural (Tabela 4.2). Este índice é uma ferramenta essencial para a interpretação do processo de homogeneização de um corpo a partir modelos de corpos simplificados. Gera-se, portanto, informações em profundidade e posição geográfica de diversas fontes magmáticas (Reid *et al.* 1990). As anomalias geradas por corpos geológicos em um campo podem ser das mais diversas e complexas e, por isso, para uma interpretação apropriada, faz-se necessário um conhecimento geológico prévio da

área estudada, além de sua correlação com as anomalias geradas de acordo com o índice estrutural mais adequado definido.

Tabela 4.2. Relação entre os índices estruturais e os índices geológicos e físicos (Modificado de Reid *et al.* 1990).

Índice Estrutural	Modelo Físico	Modelo Geológico
1,0	Monopolo	Contato
1,5	Dipolo	Dique Fino
2,0	Prisma	Dique
2,5	Cilindro	Pipe
3,0	Esfera	Diápiro

Na ausência de ruídos ou qualquer interferência externa, qualquer anomalia magnetométrica ou gravimétrica que seja resultante uma fonte pontual tridimensional satisfaz a equação de Euler (Equação 3.1).

$$\left((x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \right) \dots\dots\dots \text{Equação 3.1}$$

onde T é a anomalia de campo total e B de campo regional, (x_0, y_0, z_0) é a localização de uma fonte magnética e (x, y, z) é o ponto de levantamento; N é uma medida da taxa de variação de um campo com a distância e assume diferentes valores para diferentes fontes magnéticas.

Neste trabalho, a Deconvolução de Euler foi utilizada para auxiliar no desenvolvimento da interpretação quantitativa dos dados magnetométricos que, integrados aos dados geológicos presentes na bibliografia, permitiram a visualização em profundidade do condicionamento estrutural da área de estudo.

4.2 RADIOMETRIA

A radiometria, também conhecida como gamaespectrometria, é um método geofísico superficial, capaz de investigar unidades aflorantes e/ou subaflorantes, muito utilizado para análises qualitativas. Dessa forma, é considerada uma importante ferramenta em mapeamentos geológicos e prospecção mineral como um todo, por ser capaz de caracterizar diferentes tipos de rochas, de acordo com suas respectivas assinaturas de radioatividade (Moxham 1963, Pires & Harthill 1989).

Os principais elementos radioativos presentes em minerais pertencentes em determinadas rochas e solos estão relacionados na Tabela 4.3 com suas respectivas rochas de ocorrência.

Tabela 4.3. Relação entre os radioelementos e os respectivos minerais e rochas de ocorrência (Telford *et al.* 1990).

Elementos Radioativos	Minerais	Ocorrências
Potássio	Microclina e Ortoclásio	Granitos ácidos e pegmatitos
	Muscovita	Granitos ácidos e pegmatitos
	Alunita	Alteração de vulcânicas ácidas
	Silvita a Carnalita	Depósitos sedimentares salinos
Tório	Monazita e fosfatos de terras raras	Granitos, pegmatitos e gnaisses
	Torianita	Granitos, pegmatitos e depósitos de aluvião
	Torita, Unanotorita	Granitos, pegmatitos e depósitos de aluvião
Urânio	Uraninita	Granitos, pegmatitos e veios com Ag, Pb, Cu e outros
	Carnotita	Arenitos
	Gumita (alteração de uraninita)	Associados com uraninitas

A aplicação deste método se destaca em áreas de estudo desprovidas de afloramentos e com predomínio de solo espesso, como o caso deste trabalho. É importante ressaltar sua aplicabilidade para identificação de zonas de hidrotermalismo que, em sua maioria, estão associadas a mineralizações dos diferentes tipos e, conseqüentemente, é um método muito utilizado na busca de depósitos minerais das mais diversas naturezas.

Dentre os elementos químicos radioativos, o urânio (U^{238}), o tório (Th^{232}) e o potássio (K^{40}) são os principais radioelementos que contribuem para a radioatividade natural das rochas. Os isótopos destes elementos desintegram-se espontaneamente e emitem partículas que liberam energia na forma de radiação eletromagnética. Tais radioelementos são considerados litófilos e apresentam concentrações mais significantes nas rochas ígneas ácidas se comparada às concentrações presentes nas intermediárias, básicas e ultrabásicas, como exemplificado na Tabela 4.4, Figura 4.2 e Figura 4.3 (Neuerburg 1956 *in* Kearey *et al.* 2009).

Tabela 4.4. Assinatura radioativa das rochas ígneas (Telford *et al.* 1990).

Radioelementos	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
Rochas Graníticas	4,00	13,00	4,10
Rochas Basálticas	0,60	2,00	1,50
Rochas Ultrabásicas	0,02	0,06	0,02

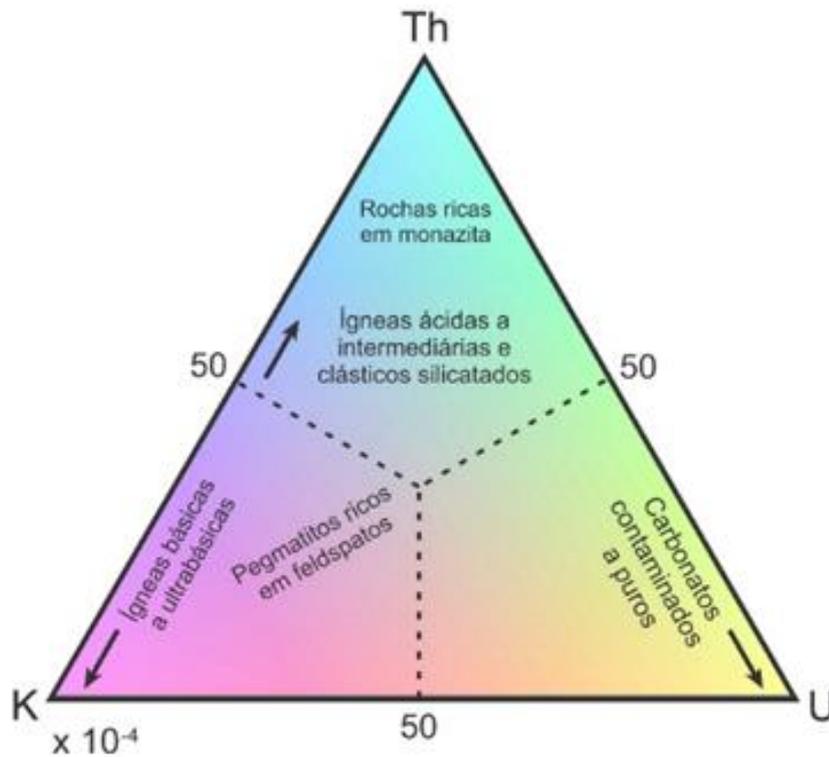


Figura 4.2. Quantidade relativa de radioelementos nos tipos de rochas mais comuns (Kearey *et al.* 2009).

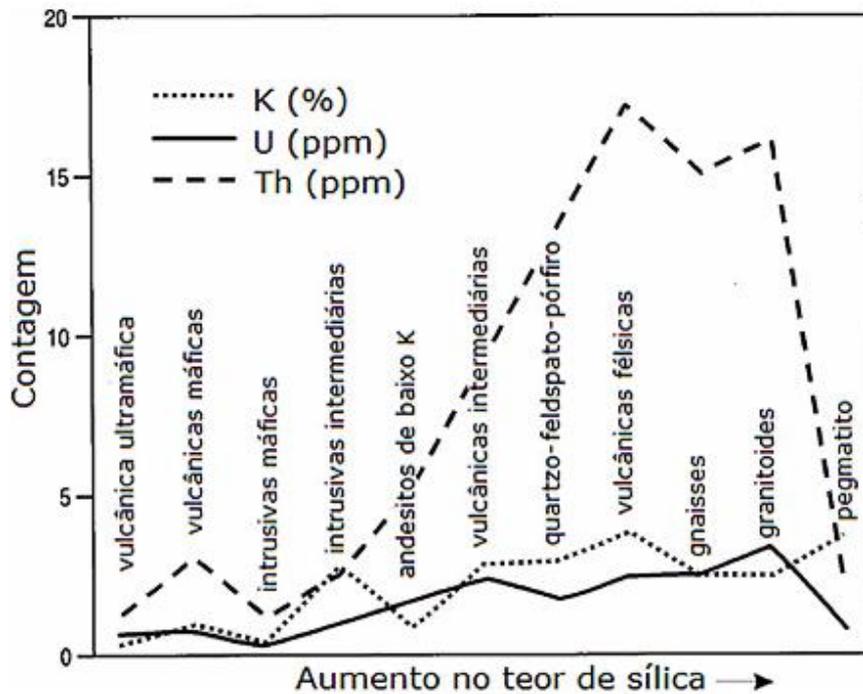


Figura 4.3. Variação dos teores dos radioelementos potássio, urânio, tório em rochas ígneas em relação aos seus diferentes teores de sílica (Si) (Dickson & Scott 1997).

O método radiométrico possibilita o aperfeiçoamento da prospecção mineral, pois é capaz de englobar uma área muito maior em menor tempo e baixo custo relativo. Isso porque, a partir da

variação das concentrações dos elementos químicos radioativos constituintes das rochas e solos, são evidenciados contrastes que auxiliam na delimitação de contatos geológicos encobertos, e identificação de zonas hidrotermais a partir da relação entre tório e urânio, já que o urânio sofre oxidação e é remobilizado das rochas encaixantes.

O mapa de contagem total consiste na medida da radioatividade total; o mapa ternário representa as variações das concentrações dos três isótopos de U^{238} , Th^{232} e K^{40} e os mapas de concentração absoluta (canal de potássio, urânio, tório) são muito úteis na identificação de contatos geológicos e diferenciação dos tipos de rochas, e podem exercer papel importante no auxílio de campanhas de mapeamento.

Já os mapas das razões Th/K e U/Th podem ser usados no estudo de processos intempéricos, visto que minerais primários de tório são mais resistentes ao intemperismo em relação aos minerais primários de potássio e urânio, podendo também caracterizar processos geológicos secundários de alteração supergênica e lixiviação. De maneira análoga, o mapa da razão U/K , assim como a imagem ternária, é capaz de salientar as variações nas concentrações de urânio e potássio na composição das rochas estudadas.

Por último, o mapa de parâmetro F , que consiste na análise conjunta entre o radioelemento potássio e a razão U/Th . Comumente utilizado para identificar áreas anômalas de potássio por intermédio do antagonismo entre o tório e potássio, muito comum em regiões com alteração hidrotermal e enriquecimento secundário de potássio (Telford *et al.* 1990).

.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE QUALITATIVA

Este capítulo objetiva apresentar a interpretação geofísica dos mapas gerados a partir dos dados aerolevantados de radiometria e magnetometria do Projeto Itabira-Ferros (escala 1:25.000). Estes mapas foram elaborados utilizando o *software Geosoft Oasis Montaj 7.0.1* e integrados às informações geológicas no *software ArcGIS 9.3*. A área investigada abrange uma porção de 900km² localizada na porção sudoeste do estado de Minas Gerais, inserida nas folhas Ipatinga e Conceição do Mato Dentro (escala 1:100.000) e pertencentes ao Projeto Leste e Espinhaço, respectivamente.

Também é objetivo deste capítulo a integração dos mapas e apresentados correlacionados aos dados geológicos publicados no mapa geológico de Minas Gerais (1:100.000), publicado em 2014 pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (Codemig), em parceria com Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A integração e interpretação dessas informações obtidas são de extrema importância para o presente estudo, pois a visualização integrada de tais dados se torna uma ferramenta essencial para a identificação de possíveis áreas alvo para mineralização de esmeralda e água-marinha por meio do método intuitivo gráfico.

5.1 BANCO DE DADOS GEOFÍSICO

O banco de dados aerogeofísicos utilizados neste estudo é o resultado do Programa de Levantamentos do Projeto Itabira-Ferros, “Gemas de Minas Gerais, - Levantamento Aéreo Magnetométrico e Gamaespectométrico da Faixa Itabira-Ferros” (Geomag 1996) (Figura 5.1). Este levantamento foi executado pelo convênio entre o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) e a CPRM (Serviço Geológico do Brasil), no qual foram coletados os dados magnetométricos e radiométricos de uma área de aproximadamente 4600km² em escala de semidetalhe (1:25.000).

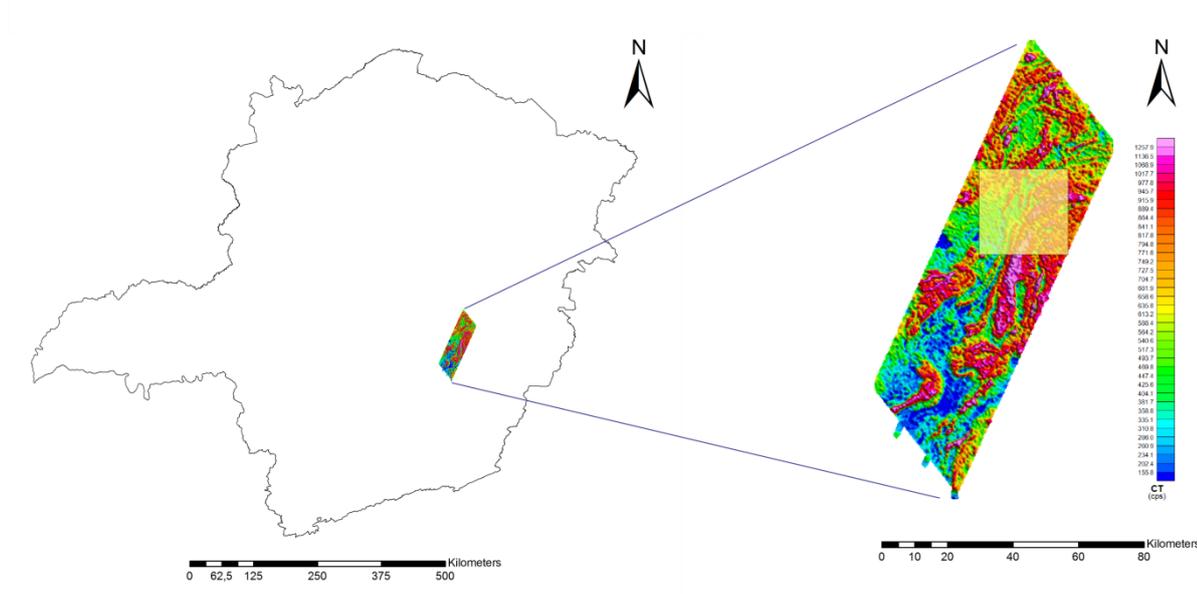


Figura 5.1. Projeto Itabira Ferros no estado de Minas Gerais e disposição geográfica da área de estudo nos limites deste projeto.

O aerolevanteamento em questão constituiu-se de linhas de voo na direção N40W espaçadas em 0,5km e linhas de controle de direção N24E com espaçamento de 12km entre si. A metodologia de aquisição de dados foi concluída por meio de medições sucessivas com intervalos de 1s (magnetômetro) e 10 vezes por segundo (espectrômetro), o que, espacialmente, indica medições de 60m em 6m ao longo dos perfis de voo, respectivamente. A altura média dos vôos realizados foi de 150m (com variações de +/-15m) acima do terreno e velocidade média operacional de 180km/h. A base de operações foi implantada na cidade de Barão de Cocais (MG), bem como o magnetômetro de controle, que foi instalado no aeroporto da cidade (Geomag 1996). O processamento dos dados obtidos foi realizado pela GEOMAG, em seu centro de computação sediado no Rio de Janeiro, RJ, de maneira que foram corrigidos, preparados, tratados e compilados para a obtenção do resultado final, publicado em 1996 e cedido pela CPRM para o desenvolvimento do presente estudo.

5.2 ANÁLISE RADIOMÉTRICA

Devido ao caráter superficial do método radiométrico, confere a radiometria a sua aplicabilidade associada à correlação entre as assinaturas radiométricas e as feições litológicas em superfície. Essa associação se dá a partir dos diferentes níveis de radioatividade dos isótopos Tório (^{232}Th), Urânio (^{238}U) e Potássio (^{40}K) presentes nas rochas aflorantes, e, por isso é uma ferramenta muito importante para realização de mapeamentos geológicos e estudos de integração geológica-geofísica.

Para análise superficial da área de estudo os dados radiométricos foram processados de maneira similar, aplicando-se os procedimentos matemáticos por instrumento da mínima curvatura sem necessidade da aplicação de filtros. Como resultado, foram confeccionados 9 mapas temáticos: mapas das assinaturas dos canais Urânio (Rad U), Tório (Rad Th) e Potássio (Rad K); mapas das suas razões (Rad U/K, Rad U/Th, Rad Th/K); mapa de contagem total; mapa de Fator F ou parâmetro F e imagem ternária CMY (Ciano = potássio, Magenta = urânio, Yellow = tório) das rochas presentes na área de estudo (Figura 5.2).

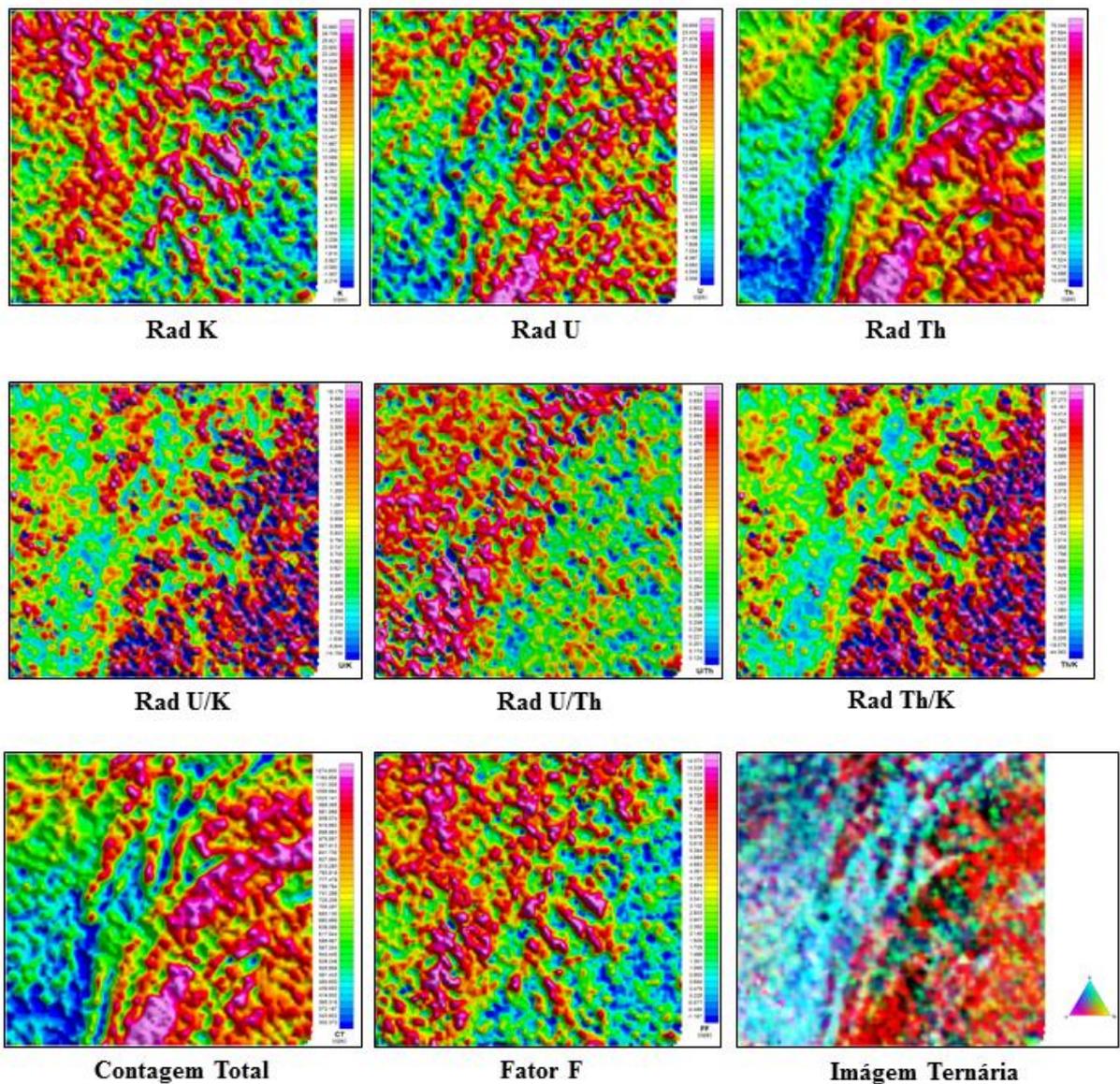


Figura 5.2. Fluxograma dos mapas radiométricos temáticos gerados no *software OASIS MONTAJ 7.0.1*, nomenclatura vide texto.

De maneira geral, pode-se dizer que a interpretação qualitativa foi realizada principalmente por meio da imagem ternária CMY e do mapa de Th (Figura 5.3), uma vez que esta possui grande afinidade litológica e se apresenta em conformidade com o mapeamento regional da área. Dessa forma, foram estabelecidas 8 fácies radiométricas, ou radiofácies, interpretadas e analisadas a partir das assinaturas dos radioelementos e sua concentração presente nos mapas temáticos gerados, quantificados entre alto, médio e baixo.

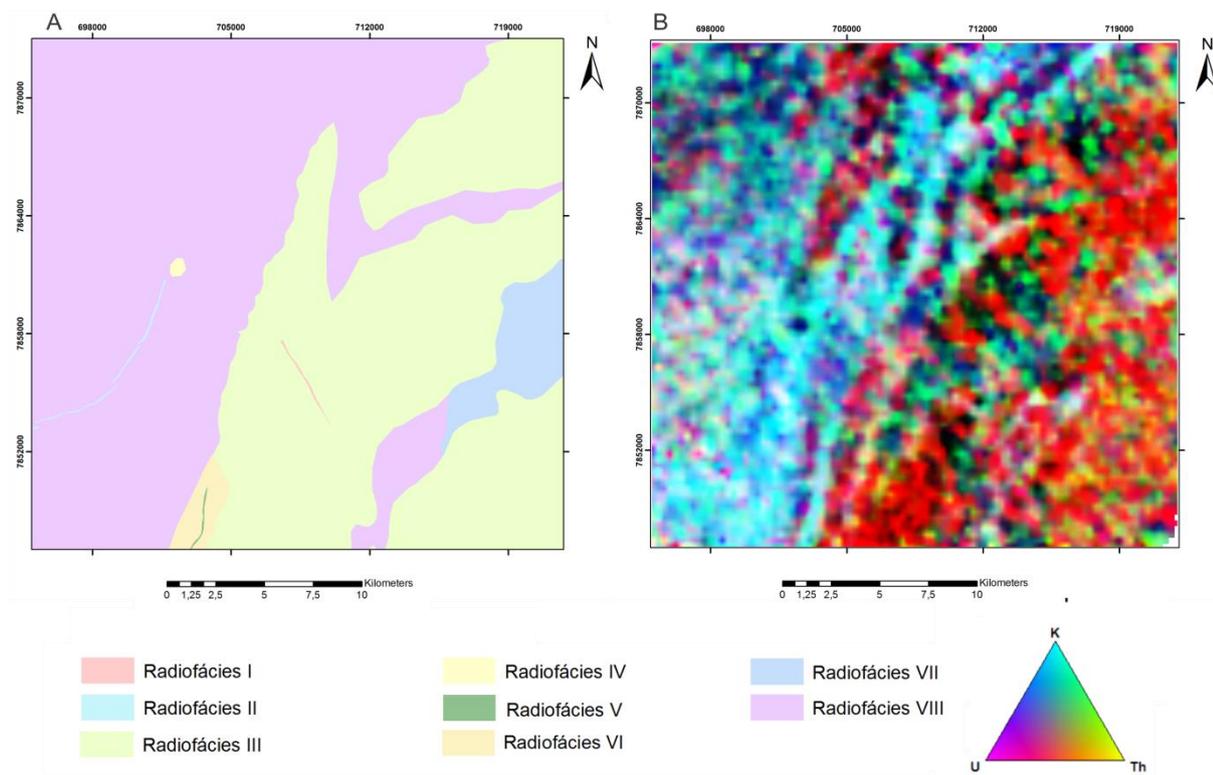


Figura 5.3. A. Mapa com as radiofácies definidas; B. Imagem Ternária original.

Assim, as diversas radiofácies identificadas na região de estudo foram particularizadas segundo seus respectivos teores relativos de tório (Th), potássio (K) e urânio (U) e quantificadas em muito alto, alto, intermediário, baixo e muito baixo, para se correlacionar assim, às concentrações de cada um dos isótopos nos diferentes domínios litológicos presentes na área, como indicadas na

Foram ainda interpretados, por meio da análise combinada dos mapas gerados, mas principalmente a partir do mapa de Th, 185 lineamentos superficiais que apresentam direção preferencial NNW e NW, bem como também ocorrem na direção E-W, a partir da sua visualização em roseta utilizando o *software Open Stereo 0.1.2*, como mostra a Figura 5.4

Tabela 5.1.

Foram ainda interpretados, por meio da análise combinada dos mapas gerados, mas principalmente a partir do mapa de Th, 185 lineamentos superficiais que apresentam direção

preferencial NNW e NW, bem como também ocorrem na direção E-W, a partir da sua visualização em roseta utilizando o *software Open Stereo 0.1.2*, como mostra a Figura 5.4

Tabela 5.1. Radiofácies interpretadas na área de estudo e suas concentrações relativas de Potássio (K), Urânio (U) e Tório (Th).

Radiofácies	Teor de K	Teor de U	Teor de Th
I	Alto a baixo	Médio a alto	Médio a alto
II	Alto a médio	Baixo a médio	Médio a baixo
III	Alto	Médio	Alto a baixo
IV	Baixo a alto	Alto a médio	Alto a médio
V	Médio a alto	Baixo	Médio a baixo
VI	Médio a baixo	Alto a baixo	Alto a baixo
VII	Baixo a médio	Alto a médio	Alto a médio
VIII	Alto a médio	Alto a Baixo	Baixo a alto

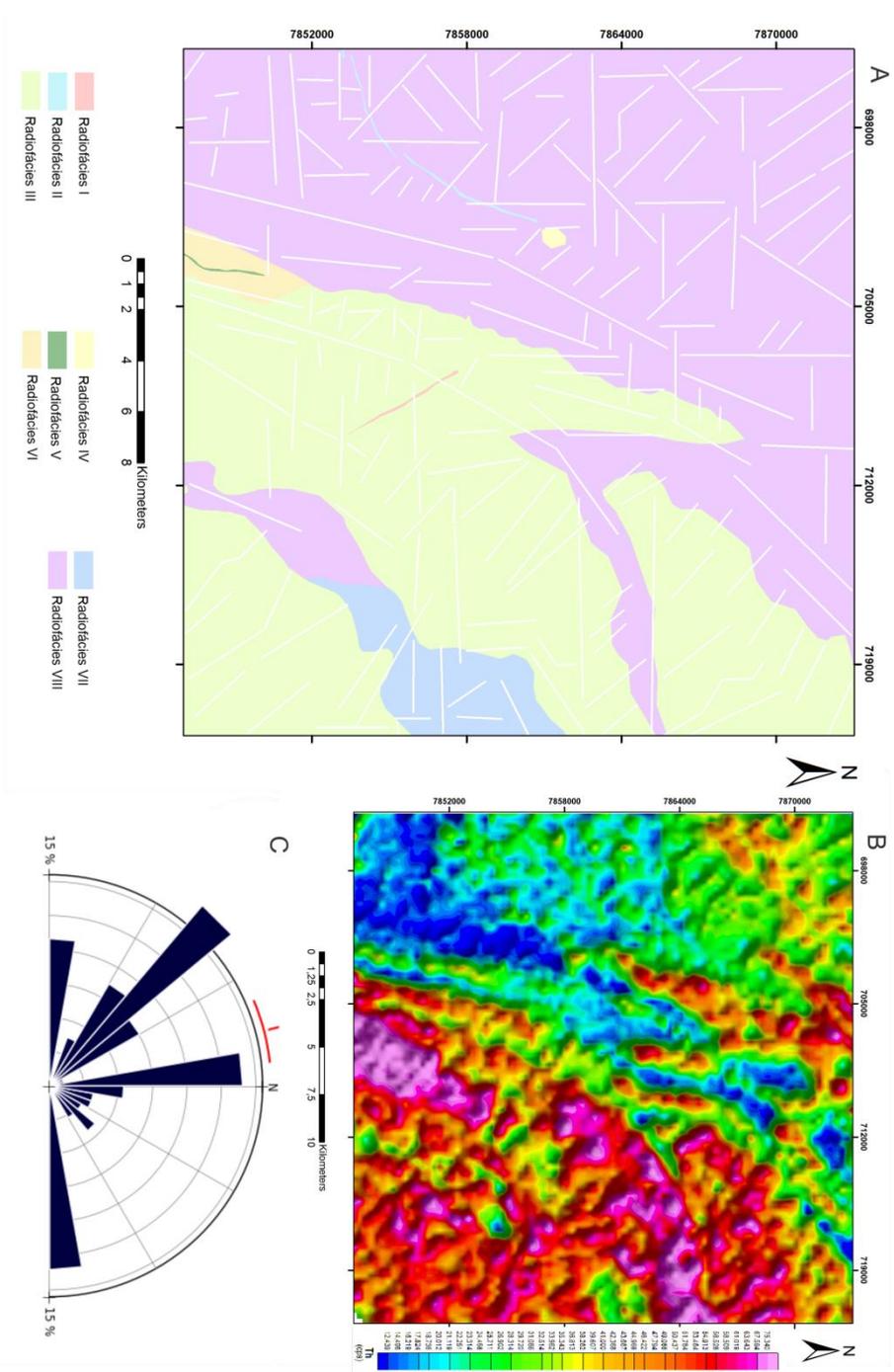


Figura 5.4. A. Mapa com as radiofácies definidas e os lineamentos interpretados; **B.** Mapa de Tório; **C.** roseta (produzida no OpenStereo) com as respectivas direções dos lineamentos.

5.3 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

A partir da metodologia citada no primeiro capítulo deste estudo (Item 1.4), foram confeccionados 6 mapas temáticos a partir dos dados de magnetometria, como mostra o fluxograma (Figura 5.5). Estes mapas foram gerados seguindo a rotina MAGMAP. Foi preparado o *grid* a ser filtrado (pré-processamento) bem como foi calculada a transformada rápida de Fourier. Esta foi realizada com o intuito de modificar o domínio do espaço para o da frequência e, então, aplicou-se filtragens ou as derivações desejadas sobre o *grid* original já processado, para geração dos mapas temáticos de interesse: mapas de derivadas, mapa de ASA e DASA.

Os mapas são resultantes da manipulação dos registros da magnetização presente devido às heterogeneidades da susceptibilidade magnética das rochas na área investigada, auxiliando assim na interpretação de feições estruturais em subsuperfície. Dessa forma, foram empregadas filtragens e derivações com o propósito de destacar tais estruturas, bem como ressaltar as anomalias das rochas em superfície. Dessa forma, é possível estabelecer relações para o estudo magnético da região assim como aspectos estruturais relacionados aos contrastes de magnetização evidenciados por intermédio dos mapas confeccionados: os mapas de gradiente horizontal de primeira ordem em X, Y e Z, mapa de amplitude e sinal analítico (ASA), bem como a sua derivada (DASA).

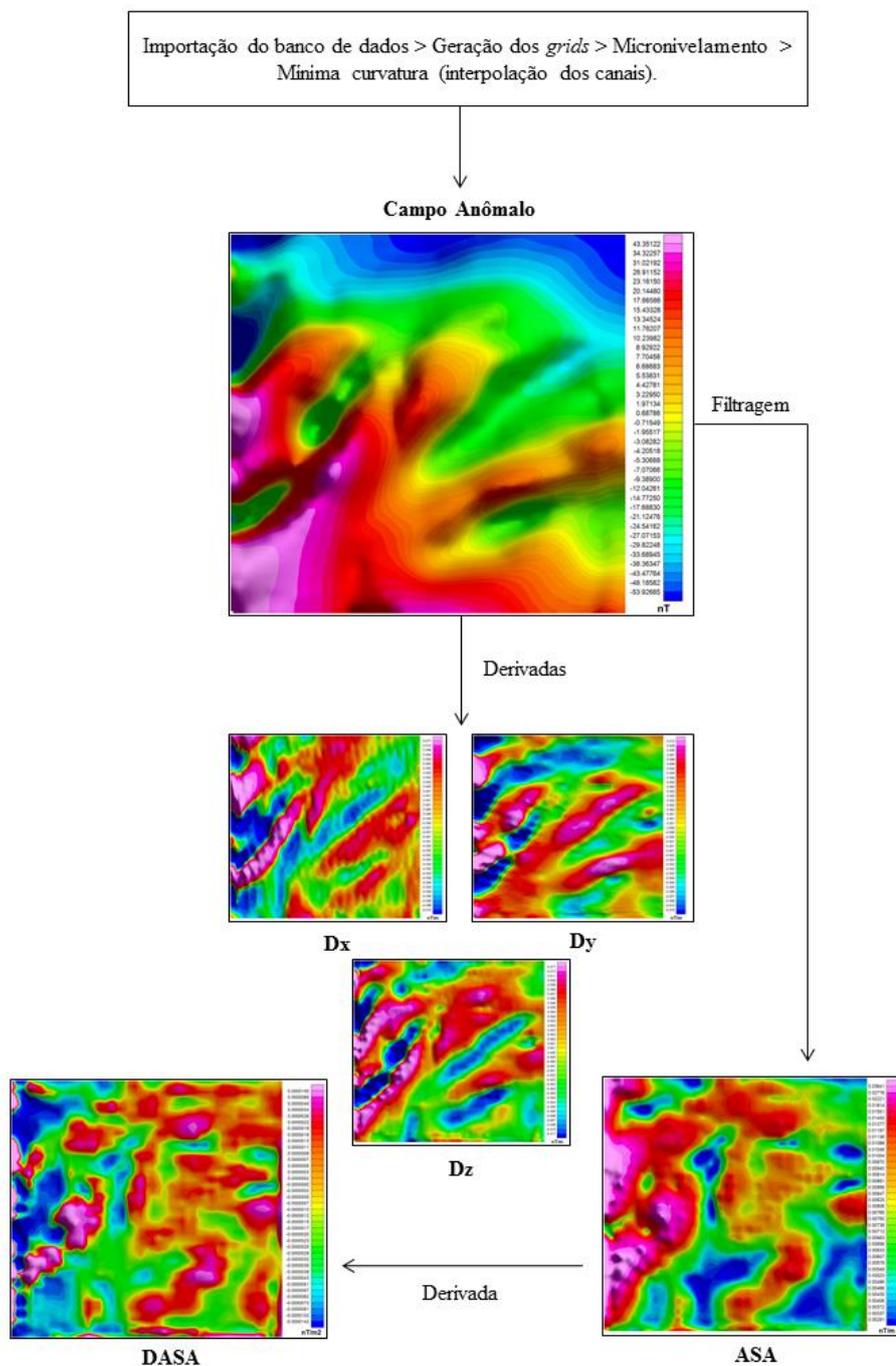


Figura 5.5. Fluxograma dos mapas magnetométricos temáticos gerados no *software OASIS MONTAJ 7.0.1*.

No intuito de caracterizar a resposta magnética mais representativa e melhor representá-la, escolheu-se o mapa de ASA por possuir assinatura monopolar (Figura 5.6). Dessa forma, as assinaturas magnéticas foram agrupadas de acordo com suas características frequenciais, de amplitude e comprimento de onda, estabelecendo-se assim, 3 fácies magnéticas ou magnetofácies.

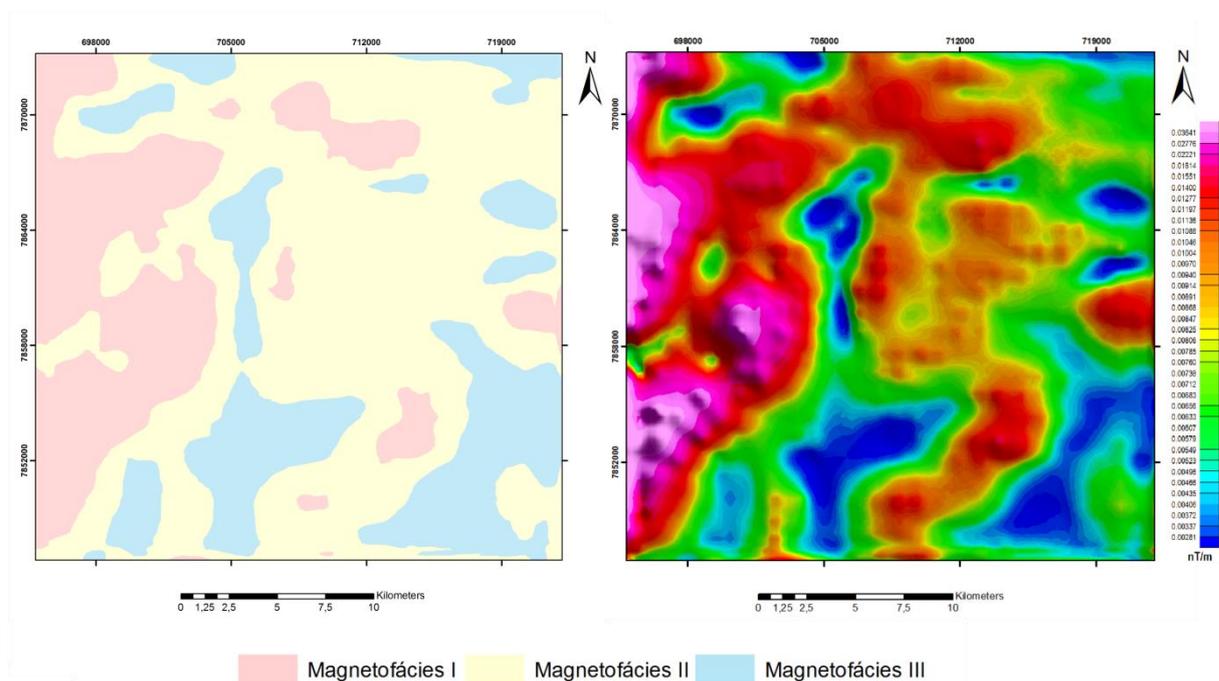


Figura 5.6. Mapa de ASA original da região de estudo à direita e magnetofácies sobrepostas à esquerda.

A Magnetofácies I constitui as regiões de maiores valores de magnetização, com valores entre 0,1197nT/m e 0,3641nT/m, o que representa alta susceptibilidade magnética, caracterizada por baixos comprimentos de onda e altas amplitudes. Ocorre principalmente na região oeste da área investigada.

A Magnetofácies II, por sua vez, é caracterizada pelos valores intermediários, que variam entre 0,00549nT/m e 0,1197nT/m, representados pelas cores alaranjadas a esverdeadas. Apresenta-se distribuída por toda a área de estudo, ocorrendo no entorno das regiões delimitadas pela Magnetofácies I, mas com maior representatividade nas porções central e leste.

A Magnetofácies III representa os menores valores de magnetização. São caracterizadas por ondas de pequenas amplitudes a altos comprimentos de onda, que variam entre 0,00281nT/m e 0,00549nT/m e, portanto, constituem as áreas de menor susceptibilidade magnética. Na área estudada, essas regiões estão localizadas de maneira espaçada e limitadas em pequenos corpos.

Foi concluída ainda, a interpretação dos lineamentos regionais da área por meio dos demais mapas temáticos confeccionados (Dx, Dy, Dz e DASA). Foram identificados 366 lineamentos principais que, a partir da visualização em *stereonets* (por meio do *software Open Stereo 0.1.2*) mostraram uma direção preferencial E-W e outra NNE, como mostrada na Figura 5.7

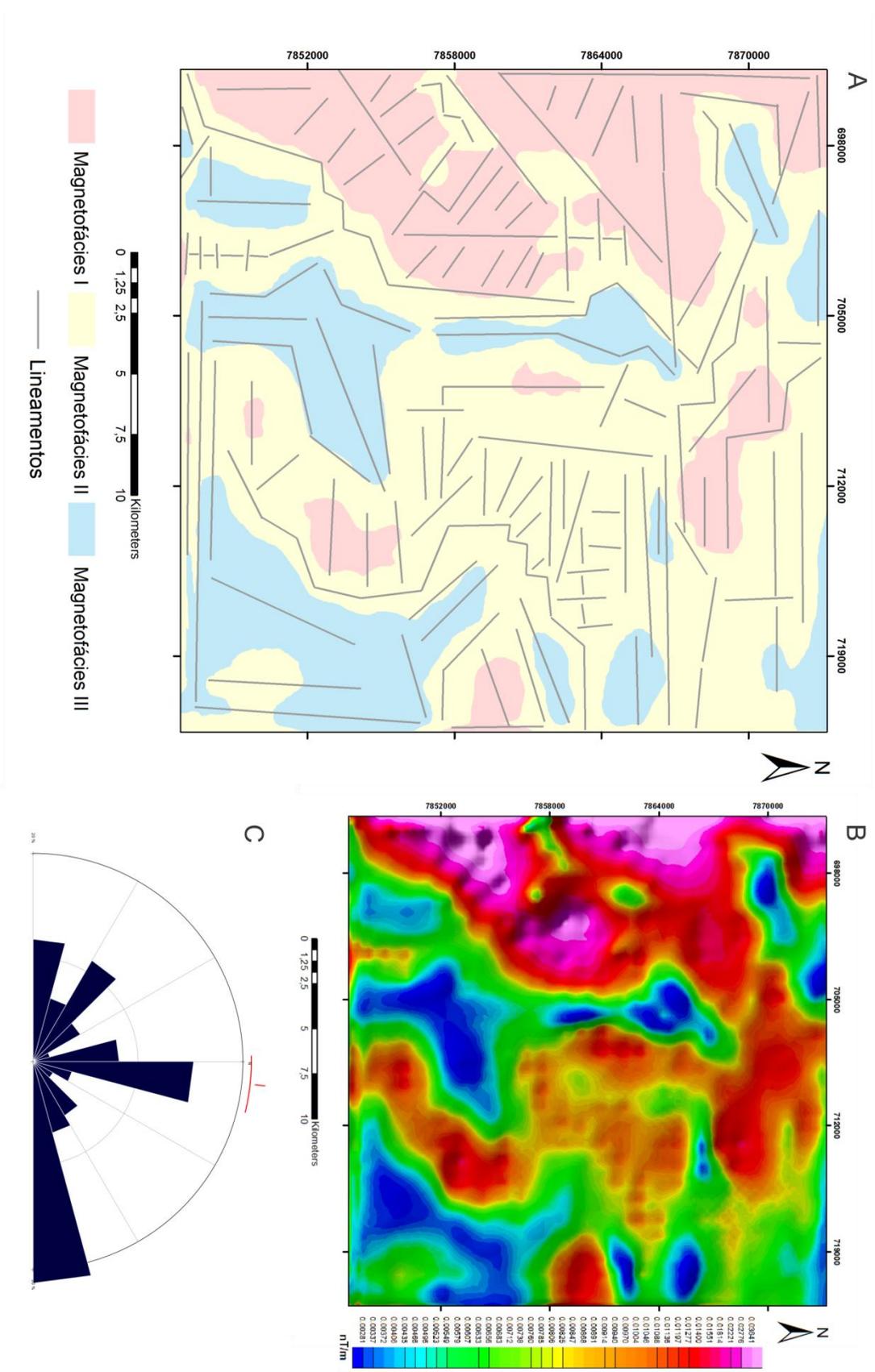


Figura 5.7.A Mapas das magnetofácies e lineamentos interpretados; **B.** Mapa de ASA original; **C.** Roseta (produzida no *OpenStereo*) com as respectivas direções dos lineamentos traçados.

5.4 BANCO DE DADOS GEOLÓGICO

Para a conclusão da integração geológica geofísica, utilizou-se como referência o mapa e as informações no formato *shapefile* do mapa geológico do estado de Minas Gerais. Afloram na região de estudo os granitos gnaisses de idade arqueana do Complexo Guanhães; as rochas do Supergrupo Rio das Velhas Indiviso; litologias do Grupo Nova Lima, caracterizadas principalmente por: formações ferríferas, quartzitos, metagrauvacas, xistos, metaúltramáficas, metamáficas, calcissititos e metacherts; filitos, xistos e conglomerados. Também estão presentes filitos, xistos, quartzitos e (meta)conglomerados pertencentes ao Grupo Maquiné, bem como os corpos graníticos Açucena e Garcia, componentes da Suíte Borrachudos e rochas metabásicas e litologias do Grupo Serra da Serpentina, principalmente composto por itabiritos.

Contudo, algumas das informações presentes na bibliografia consultada apresentam-se incongruentes com algumas das informações presentes nas folhas em que a área estudada se insere (Ipatinga e Conceição do Mato Dentro). Nesse caso, as rochas do Grupo Guanhães, presentes na porção sudeste da área, em contato com o Supergrupo Rio das Velhas Indiviso, foram mapeadas como parte integrante do Complexo Mantiqueira na Folha Ipatinga. Já as rochas metabásicas, aflorantes na porção centro-sul da quadrícula, foram denominadas como rochas fanerozóicas intrusivas na Folha Conceição do Mato Dentro. Portanto, tomou-se como referência para esse estudo o banco de dados pertencentes ao mapeamento do estado de Minas Gerais lançado em 2014 pela CPRM.

5.5 INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA E GEOFÍSICA

Primeiramente, realizou-se a integração entre os dados radiométricos e as informações geológicas – mostradas na Figura 5.8 – para a realização da integração entre a geofísica e a estratigrafia presente na área estudada. A radiometria é uma importante ferramenta para o mapeamento geológico e prospecção mineral devido sua conotação superficial (baixa penetrabilidade) e, principalmente, pelo fato de que os isótopos utilizados na radiometria (U^{238} , Th^{232} e K^{40}), possuem propriedades litófilas. Trata-se, portanto, de um método capaz de caracterizar diferentes litologias e, conseqüentemente, contatos litológicos de acordo com suas respectivas assinaturas de radioatividade.

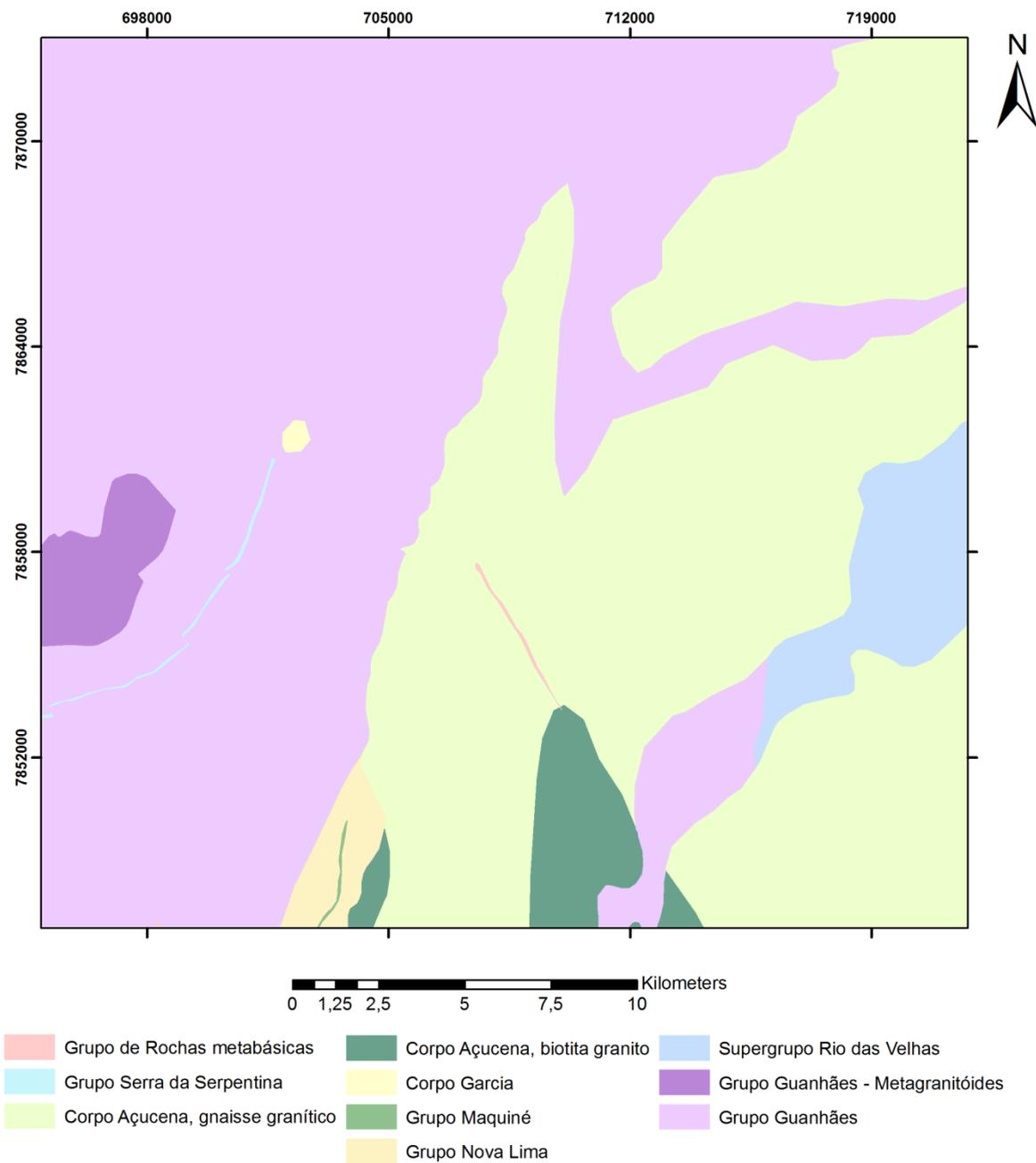


Figura 5.8. Mapa geológico da região de estudo (modificado de CPRM 2014).

Dessa maneira, é possível afirmar que a imagem ternária é largamente aplicada no exercício de caracterização geológica, pois a disposição conjunta da distribuição dos radioelementos em uma única imagem contribui para a delimitação das composições das unidades geológicas presentes em uma dada área. De fato, como mostram a Figura 5.3 e a Tabela 5.2, as unidades mapeadas se correlacionam harmonicamente com a imagem ternária.

Tabela 5.2. Correlação entre as respostas radiométricas e as unidades litológicas presentes na área de estudo.

Radiofácies	Litologia	Teor de K	Teor de U	Teor de Th
I	Grupo de Rochas Básicas	Alto a baixo	Médio a alto	Médio a alto
II	Grupo Serra da Serpentina	Alto a médio	Baixo a médio	Médio a baixo
III	Corpo Garcia	Alto	Médio	Alto a baixo
IV	Corpo Açucena	Baixo a alto	Alto a médio	Alto a médio
V	Grupo Maquiné	Médio a alto	Baixo	Médio a baixo
VI	Grupo Nova Lima	Médio a baixo	Alto a baixo	Alto a baixo
VII	Supergrupo Rio das Velhas	Baixo a médio	Alto a médio	Alto a médio
VIII	Grupo Guanhões	Alto a médio	Alto a Baixo	Baixo a alto

As rochas mais antigas que ocorrem na região estudada são aquelas do Grupo Guanhões, prioritariamente caracterizadas supracrustais vulcânicas e sedimentares, normalmente granito gnaiesses. Trata-se de rochas com concentrações muito elevadas de potássio e, conseqüentemente são representadas pela fácies radiométrica VIII. Analogamente, regiões marcadas pela pouca concentração dos três radioelementos estão possivelmente associadas a esse mesmo conjunto de rochas, na porção centro norte da quadrícula, e podem apresentar-se localmente enriquecidas por urânio e tório.

A Suíte Borrachudos, caracterizada pelos corpos Garcia (Radiofácies III) e Açucena (Radiofácies IV), é caracterizada como uma suíte alcalina composta por corpos plutônicos, em sua maioria granitos ricos em feldspato potássico. Dessa maneira, como observado, sua ocorrência na região estudada está claramente associada ao enriquecimento em U e Th, e, localmente, Th e K, o que sugere que essa unidade pode ser representada pela Radiofácies III e IV. Vale ressaltar que aquelas regiões com altos teores de Th e K sugerem, portanto, zonas hidrotermalizadas que, dessa forma, podem ter contribuído para o enriquecimento em tais elementos, uma vez que coincidem com alguns dos lineamentos (possíveis falhas) interpretados.

As rochas do Supergrupo Rio das Velhas Indiviso, aflorantes na porção leste da área em questão, caracterizam a região demarcada pela Radiofácies VII. Apresentam-se com altas concentrações de urânio e tório e, em sua maioria pobre em potássio. Pontualmente, apresentam alta concentração dos três radioelementos. Já na região em que ocorrem rochas do Grupo Nova Lima, marcada pela Radiofácies VI, observa-se variação da concentração de K, U e Th, de tal forma que os valores de tório e urânio variam de elevado a intermediário, e o potássio, por sua vez, apresenta-se entre baixo e intermediário-baixo. Na porção central da área dominada pelo Grupo Nova Lima afloram, em formato alongado, as rochas do Grupo Maquiné. Estas apresentam baixos valores de urânio e tório, enquanto o potássio ocorre com concentração intermediária e são representadas pela Radiofácies V. Por fim, as metabásicas, representadas pela Radiofácies II e as rochas do Grupo Serra da Serpentina (Radiofácies I), apresentam dificultada correlação entre as informações geológicas e geofísicas. Porém, de maneira geral, é possível dizer que as rochas do Grupo Serra da Serpentina apresentam menores valores de Th e U em relação à concentração de K, que varia de alta a intermediária-baixa.

Em um segundo momento, os mapas magnetométricos também foram utilizados na integração dos dados, principalmente para análise dos aspectos estruturais e respostas magnéticas em subsuperfície. As anomalias magnéticas presentes permitem identificar, em sua maioria, as direções estruturais de uma dada região. Logo, pode-se concluir que os lineamentos magnéticos podem estar associados a possíveis zonas de cisalhamento, falhas, fraturas e dobras.

Nesse sentido, o mapa de ASA foi usado com o objetivo de ressaltar as anomalias magnéticas e sua projeção em profundidade para a superfície. Este mapa realça não só as respostas magnéticas, mas também as feições estruturais presentes (Figura 5.9). Os demais mapas de derivadas (DASA, Dx, Dy, Dz) também foram utilizados com o mesmo objetivo, possibilitando a correlação das magnetofácies presentes com as unidades litológicas identificadas na bibliografia consultada.

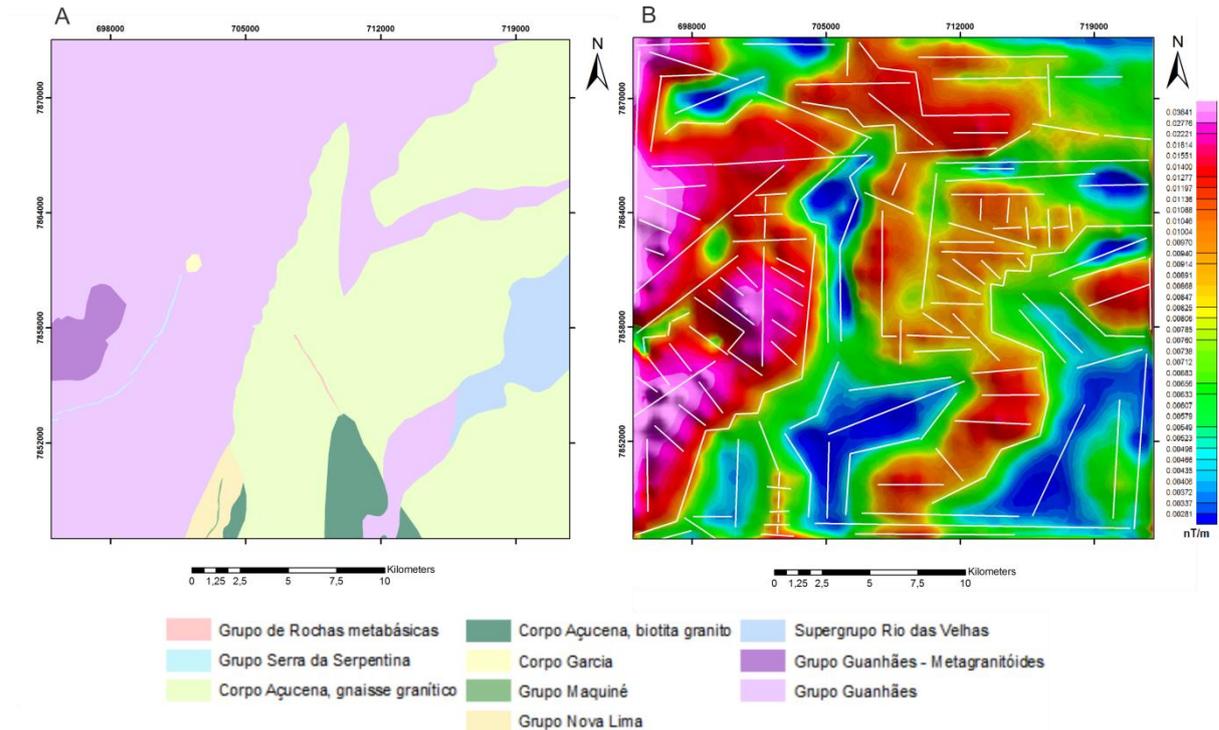


Figura 5.9.A. Mapa geológico da área de estudo **B.** Mapa de amplitude e sinal analítico (ASA) com lineamentos interpretados a partir dos dados magnetométricos.

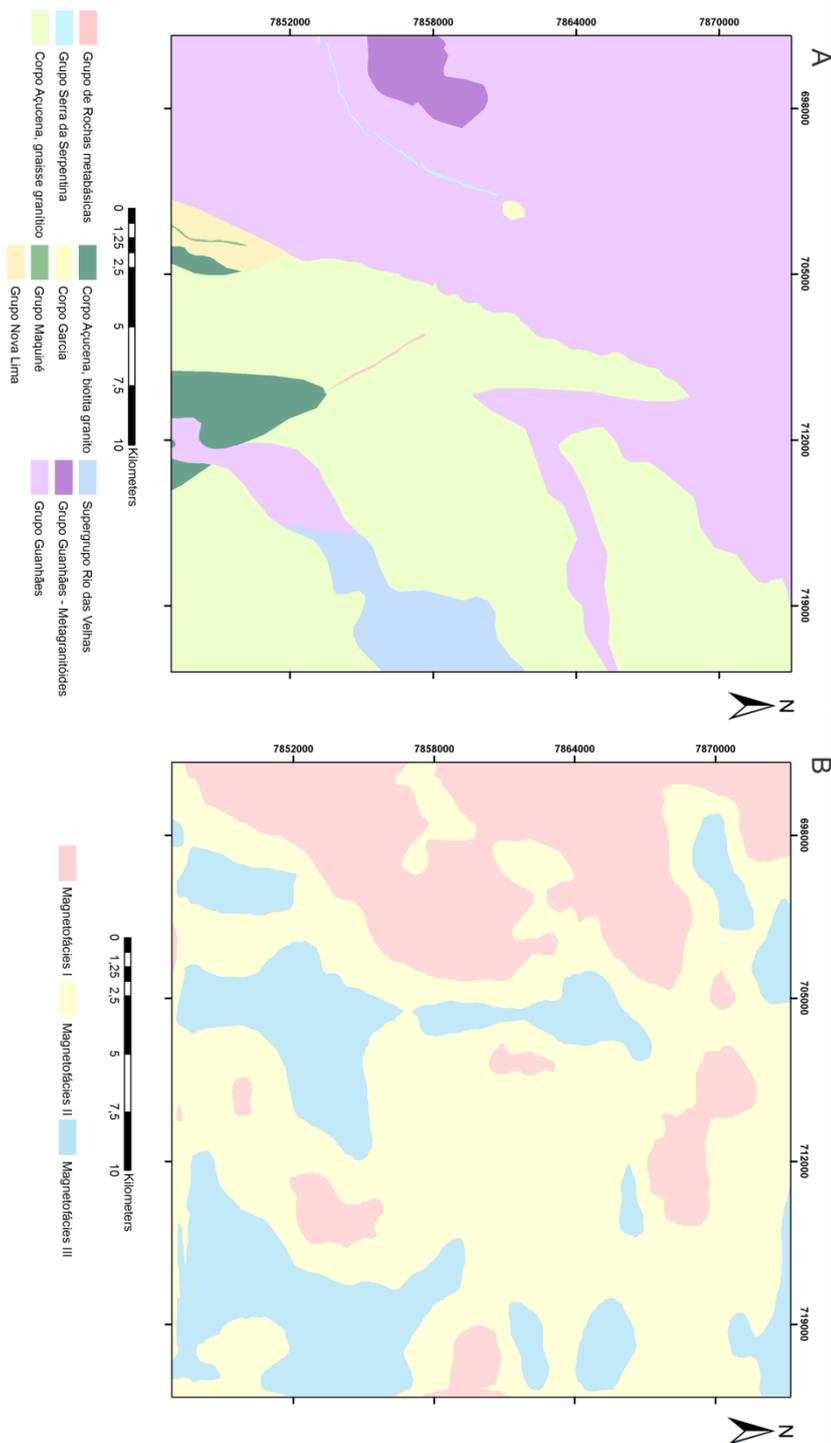
Dessa maneira, é possível correlacionar a direção dos lineamentos interpretados e dispostos na imagem acima com os contatos litológicos presentes. Sugere-se que esses contatos estão muito possivelmente associados a controles tectônicos, como é o caso do limite entre o Corpo Açucena e o Complexo Guanhões, que possui lineamentos coincidentes com os contatos litológicos em quase a totalidade da extensão dos mesmos. Analogamente, a disposição das rochas do Grupo Serra da Serpentina acompanha a mesma direção em um extenso lineamento na porção W da quadrícula (NE-NNE).

A partir da integração entre as fácies magnéticas e as informações geológicas apresentadas na Figura 5.9, é possível dizer que as regiões de mais altos valores de susceptibilidade magnética (Magnetofácies I) estão correlacionadas às rochas do Complexo Guanhões, bem como as rochas do Grupo Serra da Serpentina (itabiritos, principalmente) e o Corpo Garcia (Suíte Borrachudos). Além disso, algumas porções da área cartografada como Supergrupo Rio das Velhas Indiviso também é constituída de alta resposta magnetométrica, o que pode estar relacionado à presença de metaultramáficas.

A Magnetofácies II, por sua extensa ocorrência na quadrícula, somada ao fato de estar normalmente presente nos arredores da fácies magnetométrica I, possui correlação menos explícita com as litologias presentes, e, portanto, compõe a maioria das unidades aflorantes. São características

pela resposta intermediária de susceptibilidade magnética, ou Magnetofácies II, as áreas mapeadas como Grupo Nova Lima e Maquiné. Além disso, esse domínio cobre extensas porções do Complexo Guanhões e Corpo Açucena. Por outro lado, sua abrangência é nula nos Itabiritos do Grupo Serra da Serpentina e quase nula na região caracterizada pelo Corpo Garcia. Já a Magnetofácies III está normalmente associada às rochas do Corpo Açucena e algumas porções limitadas do Complexo Guanhões e da área delimitada pelo Supergrupo Rio das Velhas Indiviso (Figura 5. 10).

Figura 5. 10.A. Mapa geológico da área de estudo. **B.** Mapa de magnetofácies.



6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa apresentar a visualização em profundidade das estruturas relativas à assinatura da susceptibilidade magnética, obtida por intermédio dos resultados da inversão geofísica por meio da aplicação da Deconvolução de Euler. Nesse estudo, a análise quantitativa foi realizada a partir dos dados do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA). A Deconvolução de Euler (2D) consiste em estimar a profundidade média das fontes magnéticas causadoras das anomalias em coordenadas cartesianas, suas respectivas feições estruturais e geometria. De maneira análoga, a aplicação do desenvolvimento de um modelo 3D, por instrumento da *krigagem*, visa o melhor entendimento dos corpos rochosos e suas características, evidenciadas pela deconvolução, a partir da visualização tridimensional das estruturas presentes. Para tanto, foram utilizados os seguintes softwares: *Euler 1.0*; *Oasis Montaj Geosoft 7.0.1*; *ArcMap 9.3* e *ArcScene 9.3*.

6.2 METODOLOGIA

Para a realização da inversão dos dados geofísicos, tomou-se como base o mapa de ASA. Dessa maneira, o primeiro passo consistiu na definição da malha de perfis traçados no *software ArcMap 9.3*. Visto que as feições magnéticas presentes na região investigada se encontravam orientadas preferencialmente na direção norte sul, foram confeccionados 14 perfis equidistantes perpendiculares ao principal *trend* dos lineamentos geofísicos interpretados, para melhor visualização das estruturas. Estes foram, portanto, traçados na direção E-W a cada 2000m, abrangendo uma área de 900km² de extensão, como mostra a Figura 6.1.

Em seguida, os mesmos foram importados no *software Oasis Montaj 7.0.1* para a extração dos dados geofísicos ao longo das linhas traçadas. Essa sistemática, intitulada *grid profile*, consiste na seleção do *grid* em que se pretende extrair os dados supracitados, além da criação de um novo banco de dados para preservação do banco de dados original, nomeação de cada perfil traçado, e coleta das respectivas coordenadas, usualmente feita a partir do *grid*. As informações foram então extraídas de leste para oeste, exportadas no formato “.csv” e posteriormente convertidas para a extensão “.dta”, para sua utilização no *software Euler 1.0*.

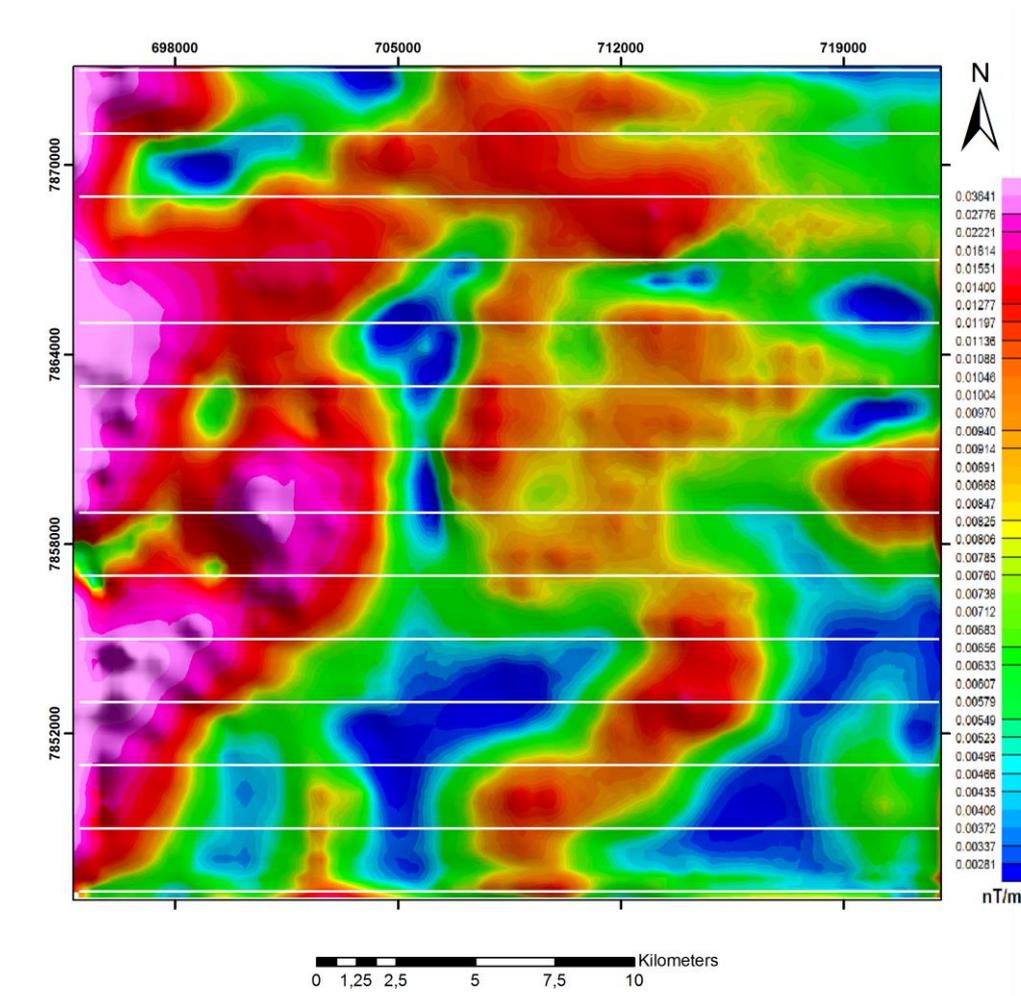


Figura 6.1. 14 perfis E-W traçados no mapa de Amplitude e Sinal Analítico.

O software *Euler 1.0*, desenvolvido na *School of Geosciences of University of the Witwatersrand*, foi utilizado para a realização da inversão dos dados geofísicos, executada a partir da inversão dos mínimos quadrados e da entrada de alguns dados (*inputs*), este programa é capaz de resolver as equações de Euler a fim de indicar as soluções da posição das anomalias presentes e das suas profundidades existentes. Dessa forma, importou-se o arquivo contendo as informações dos perfis e inseriram-se as opções de execução tomando como base os dados magnéticos do mapa de amplitude e sinal analítico, ou seja, basicamente a altura do voo do aerolevante, 100m nesse caso. Feito isso, processou-se os dados a partir dos seguintes *inputs*: índice estrutural igual a 1, tamanho da janela igual a 11 e profundidade máxima de 13.500m. Assim, uma vez processados os dados e com as coordenadas definidas, os mesmos foram importados no *ArcMap* de maneira a unir todos os perfis traçados em uma única *shape*, por meio da rotina *merge*. Dessa forma, a partir desta única *shape* contendo todos os perfis, executou-se no *ArcScene* a interpolação dos dados, ou *krigagem*, para a geração de um modelo 3D.

6.3 RESULTADOS DAS INVERSÕES PELA DECONVOLUÇÃO DE EULER

Os perfis (2D) gerados foram interpretados e, assim, foi possível observar e correlacionar as profundidades das anomalias magnéticas ao longo de toda a área investigada bem como suas fontes geradoras. De maneira geral, observa-se que as anomalias são mais superficiais em relação à profundidade máxima – aproximadamente 13.5km, mas normalmente inferiores a 10km. Foram então selecionados 3 perfis representativos para ilustração dos resultados: os perfis 4, 8 e 12, como mostra a Figura 6.2.

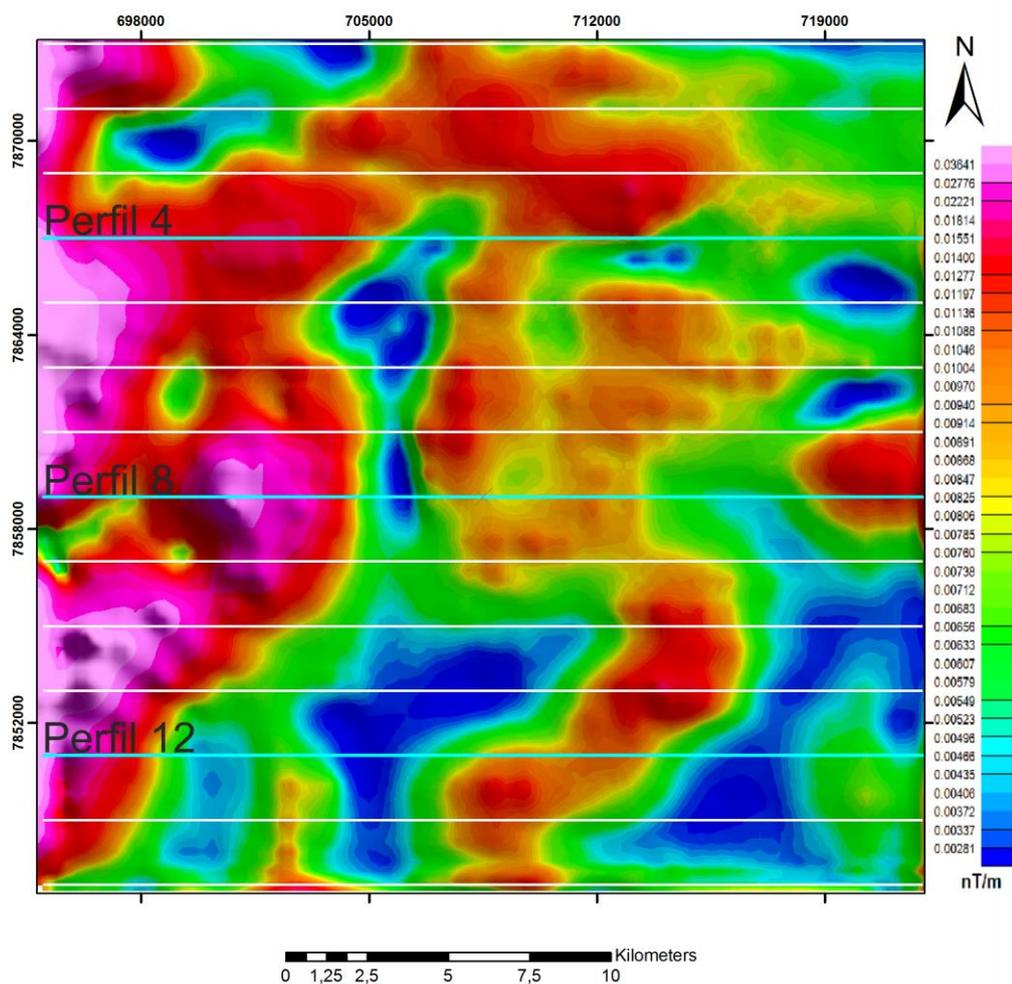


Figura 6.2. Perfis 4, 8 e 12, respectivamente, selecionados para ilustração dos resultados obtidos.

O perfil 4 (Figura 6.3) está localizado no norte da área de estudos, e apresenta anomalias que não ultrapassam 7km de profundidade. Observa-se na porção oeste da área, uma região de altos valores de susceptibilidade magnética, bem como valores baixos até intermediários no extremo leste. Dessa maneira, o quarto perfil abrange diferentes respostas magnéticas que podem ser correlacionadas a possíveis feições estruturais. De fato, a região de baixos valores na região centro-oeste entre os dois

altos magnéticos observados neste Perfil, possui resposta que se assemelha a uma falha, e chega a aproximadamente 3,5km de profundidade. Por outro lado, as anomalias associadas aos maiores valores possuem profundidade variável. Aquelas associadas aos maiores valores de magnetização das rochas são de fato, as mais superficiais (até 3.5km) em relação à anomalia situada na porção central do perfil (baixos valores magnéticos), que por sua vez atinge profundidades de aproximadamente 6,5km.

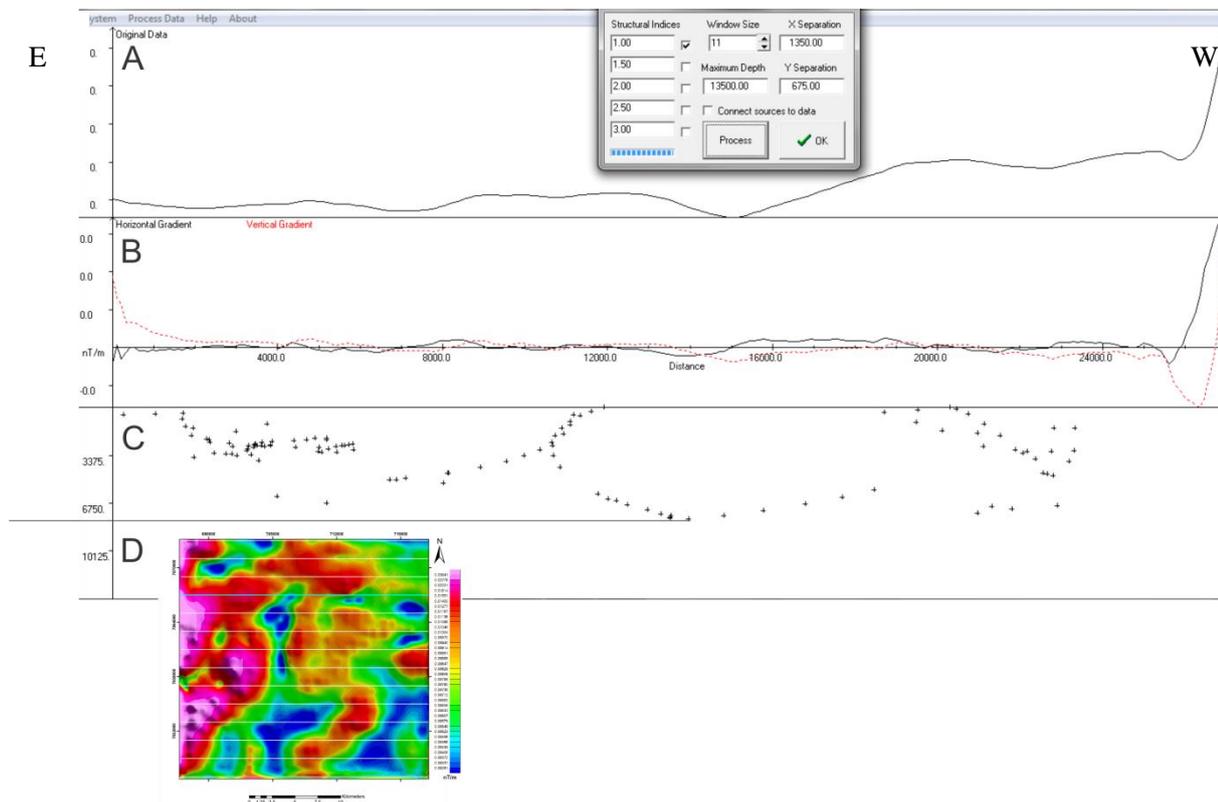


Figura 6.3. Perfil 4 de deconvolução realizado no *software Euler 1.0* a partir do mapa de ASA. O perfil mostra **A.** dados gerados; **B.** gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho); **C.** estimativas da profundidade das anomalias; **D.** Mapa de ASA.

Já o Perfil 8, traçado na porção central da região de estudo, é marcado pela presença de três anomalias situadas na porção oeste, central e leste no Perfil. Estas regiões de altos magnéticos estão associadas a anomalias que chegam a pouco menos de 7km de profundidade, localizadas nos pontos de maior susceptibilidade magnética, como mostra a Figura 6.4. Na porção leste do Perfil 8, a variação das profundidades está provavelmente associada a variação composicional das rochas presentes nessa área, que por sua vez, coincide com a zona de contato entre o Corpo Açucena e com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas Indiviso.

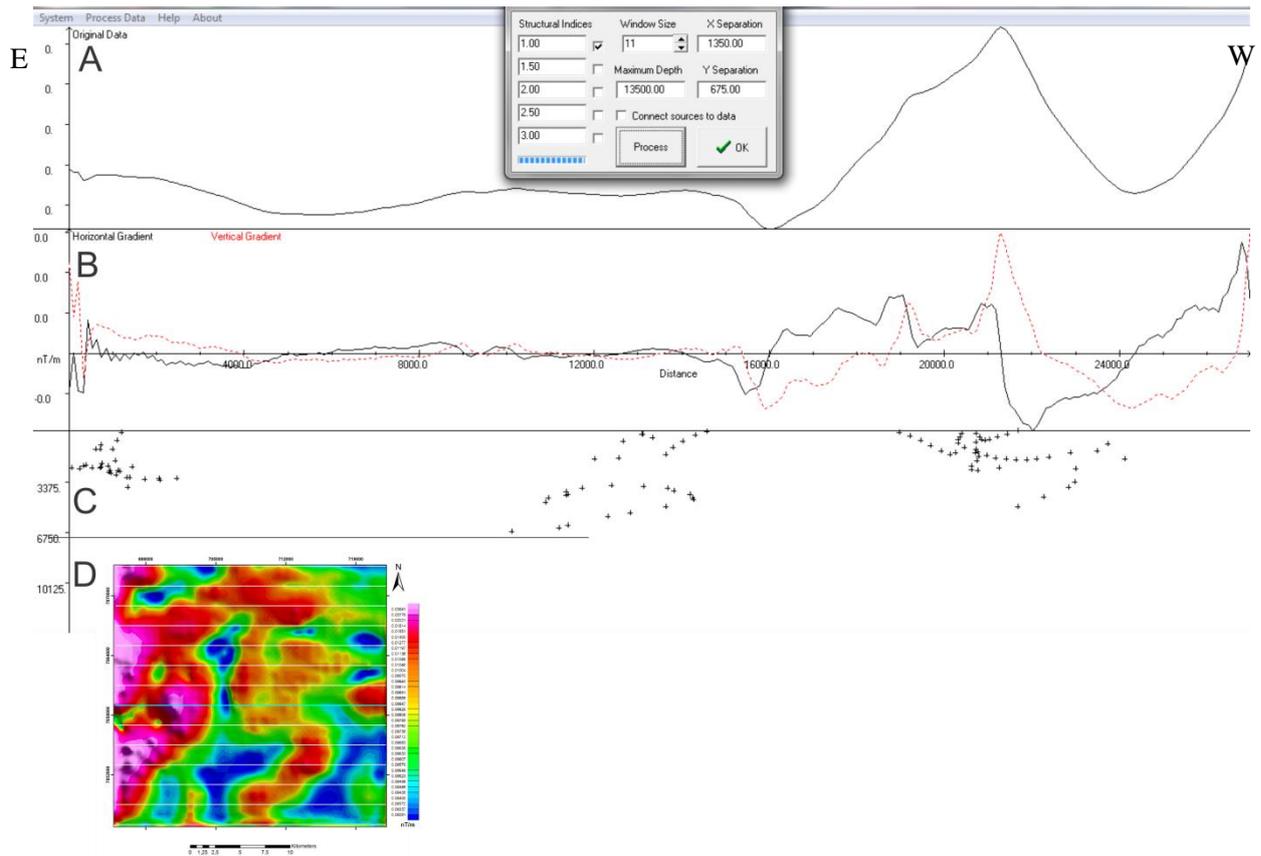


Figura 6.4. Perfil 8 de deconvolução realizado no *software Euler 1.0* a partir do mapa de ASA. O perfil mostra **A.** dados gerados; **B.** gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho); **C.** estimativas da profundidade das anomalias, **D.** Mapa de ASA.

Por fim, o Perfil 12, traçado no sul da quadrícula, é um dos perfis que possui as anomalias mais profundas, ultrapassando 10km de profundidade. Assim como os perfis supracitados, a grande anomalia que domina a região oeste da quadrícula possui profundidades reduzidas (aproximadamente 1,5km) se comparadas às demais anomalias presentes, o que é esperado devido à sua alta amplitude e baixo comprimento de onda. De maneira análoga ao Perfil 4, os baixos valores de susceptibilidade magnética apresentam feições que muito se assemelham a falhas, tanto na porção centro-oeste como no domínio leste deste perfil que, por sua vez, apresenta feição concordante com as falhas de empurrão com mesma direção preferencial NE dos lineamentos interpretados que ocorrem na região (Figura 6.5).

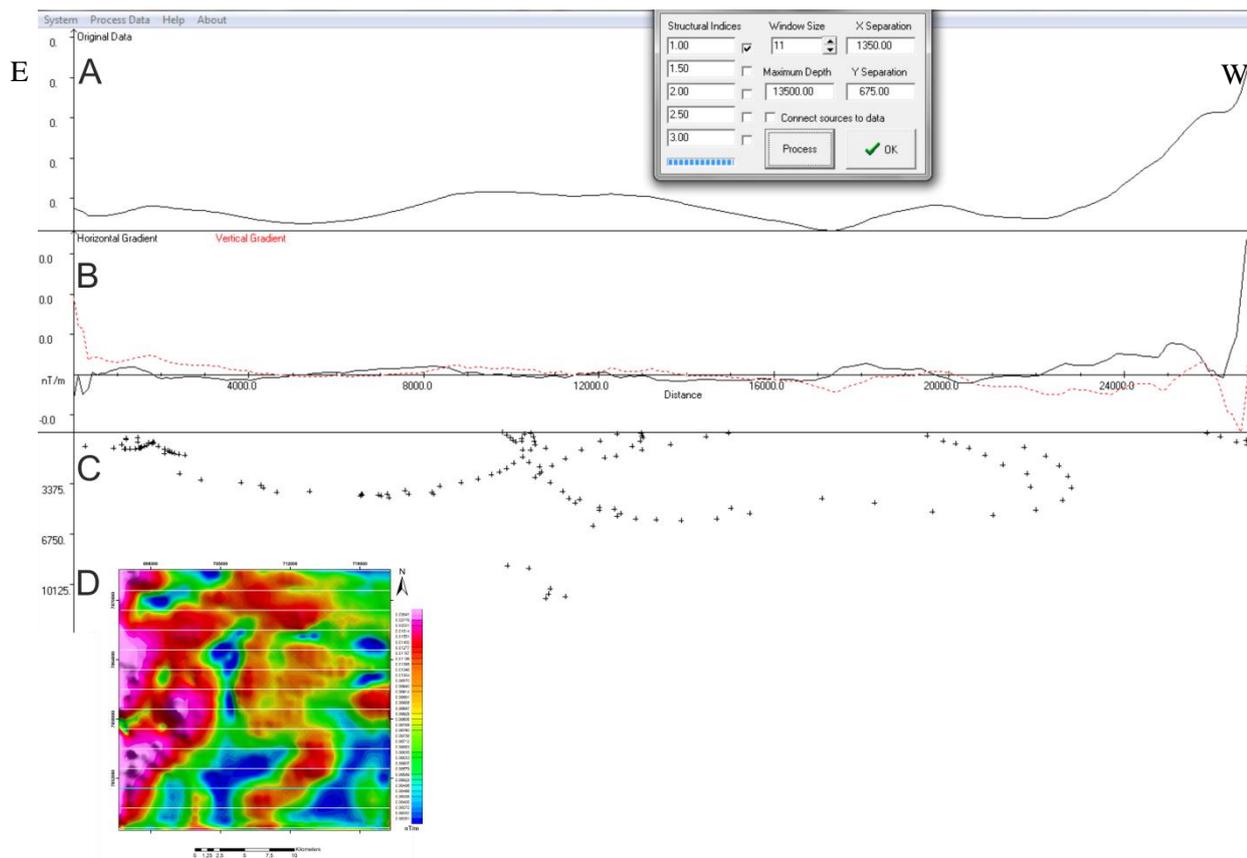


Figura 6.5. Perfil 12 de deconvolução realizado no *software Euler 1.0* a partir do mapa de ASA. O perfil mostra **A.** dados gerados; **B.** gradientes horizontais (em preto) e verticais (em vermelho); **C.** estimativas da profundidade das anomalias, **D.** Mapa de ASA.

6.4 VISUALIZAÇÃO EM 3D

Uma vez realizada a Deconvolução de Euler de todos os perfis, interpolou-se os dados obtidos por intermédio do método de *krigagem* no *software ArcScene 9.3* para gerar o modelo 3D que possibilitou a visualização das anomalias (Figura 6.6) e lineamentos presentes em profundidade, podendo relacioná-las e diferenciá-las daquelas estruturas observadas em 2D. Além disso, este modelo se torna muito importante para a visualização, pois é capaz de reproduzir a topografia média em profundidade do topo das rochas caracterizadas por possuírem susceptibilidade magnética.

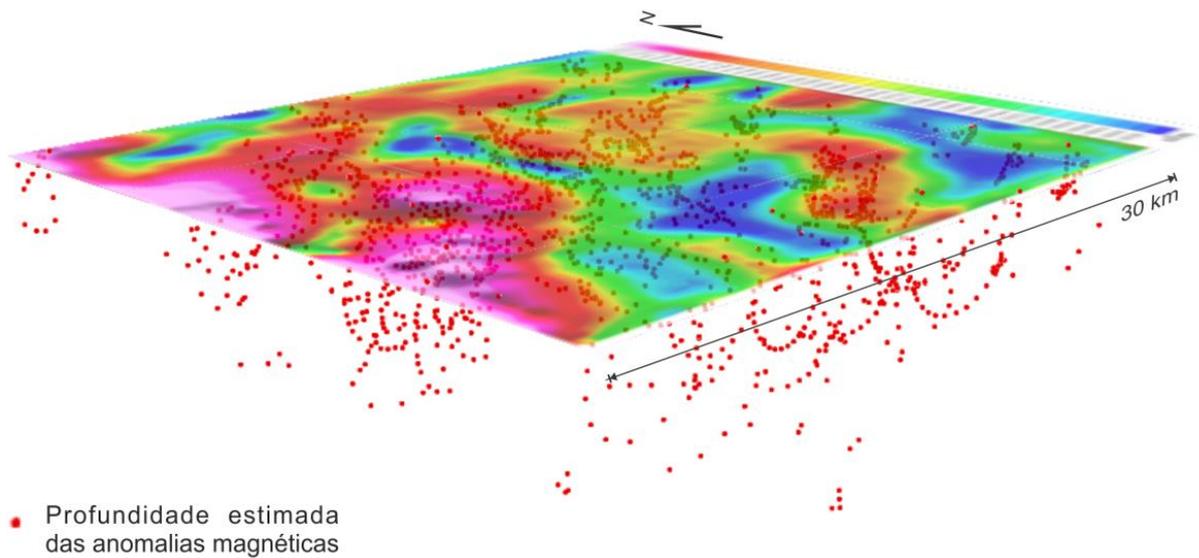


Figura 6.6. Visualização dos dados das anomalias magnetométricas (relação anomalia e profundidade estimada) com base no mapa de ASA por meio do *ArcScene 9.3*.

Dessa forma, com o objetivo de ilustrar as etapas da deconvolução até o seu último produto - o modelo tridimensional - tomou-se como exemplo o Perfil 12 (Figura 6.7). Trata-se de um perfil que apresenta os três domínios magnetométricos presentes – caracterizando áreas com baixos valores de susceptibilidade magnética nas regiões oeste e centro-leste, valores intermediários entre os baixos magnéticos e altos valores de susceptibilidade no extremo oeste do perfil. Na Figura 6.7.A. é possível ver as respostas do Perfil 12 no *software Euler 1.0.*, sendo A.1 os dados magnetométricos originais, A.2 os gradientes vertical e horizontal e os dados de inversão presentes em A.3. Ressalta-se que, na região em que a anomalia magnética é mais expressiva, esta possui respectiva fonte geradora situada em profundidades rasas, em torno de 1,5km (Figura 6.7.A.3). Em seguida, observa-se o mapa de ASA como referência 6.7.B e em 6.7.C as imagens obtidas a partir do *software ArcScene 9.3*. Por fim, o modelo tridimensional gerado por meio da interpolação dos dados é apresentado em planta (6.7.D), evidenciando que a região com as anomalias em maior profundidade estão à leste do perfil e, em 6.7.E tem-se uma visão geral do modelo 3D sobreposto pelo mapa de Amplitude do Sinal Analítico.

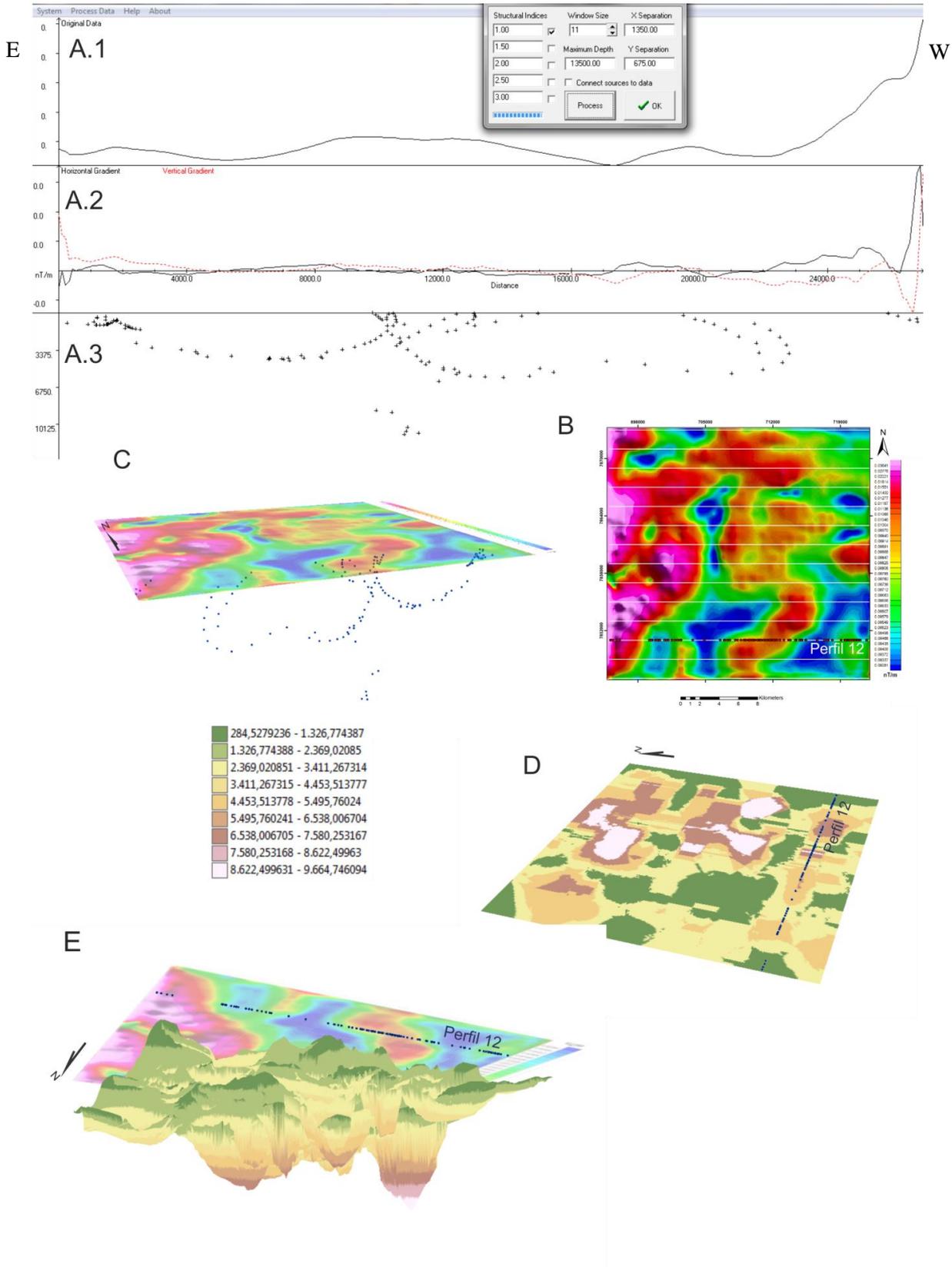


Figura 6.7. Visualização das etapas da análise quantitativa; **A.** Respostas da deconvolução de Euler no *software Euler 1.0*; **B.** Visualização dos perfis traçados no mapa de ASA. **C.** Inversão do Perfil 12 com mapa de ASA como referência; **D.** Visão em planta do modelo 3D e **E.** Visão geral do modelo magnetométrico 3D local, com o mapa de ASA sobreposto.

Na inversão dos dados realizada a partir dos dados magnetométricos, nota-se que as respostas de susceptibilidade magnética estão distribuídas ao longo de toda a área de estudo com profundidades estimadas variáveis. Pode-se afirmar que a região investigada se divide em duas regiões com características muito diferentes. A primeira, na porção W, apresenta as anomalias mais rasas em decorrência de áreas com maior magnetização. Já a porção E apresenta área com menores valores magnetométricos relativos e anomalias com fontes geradoras muito mais profundas.

Estas podem ser associadas a vários fatores, sejam eles feições estruturais ou variações composicionais das rochas presentes. Apesar da profundidade máxima observada nos perfis 2D raramente ultrapassar os 10km e ocorrerem, predominantemente, no domínio E da área de estudo. De maneira geral, as anomalias observadas na quadrícula são comparativamente mais rasas, variando desde 0,3km até aproximadamente 7km. A partir da análise do modelo 3D gerado, afirma-se que as anomalias mais profundas e, por consequência, com baixas amplitudes e elevados comprimentos de onda, se encontram na porção leste da área de estudo, com profundidades que chegam até aproximadamente 10km, mostradas de forma clara na Figura 6.8 e Figura 6.9.

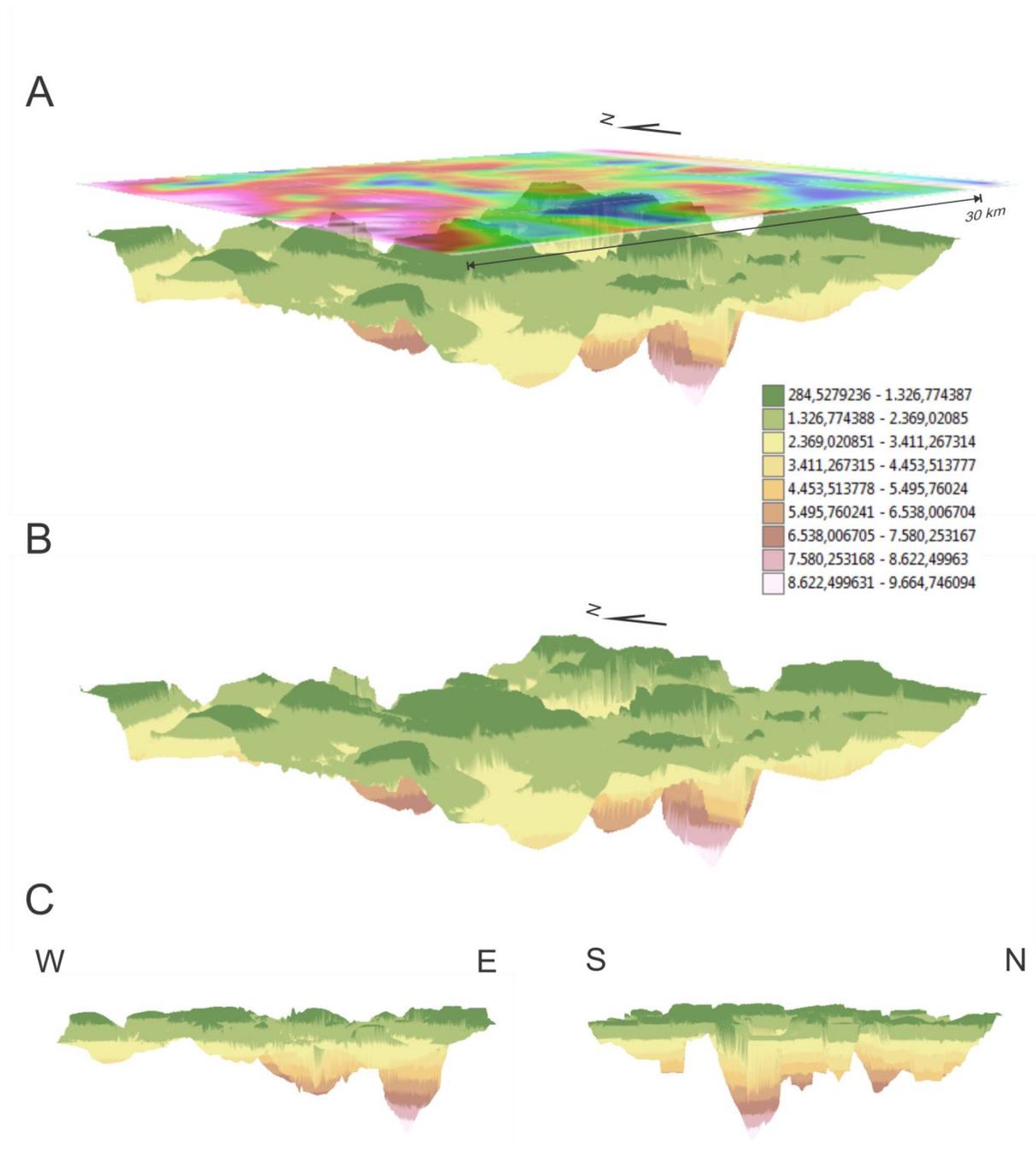


Figura 6.8. A. Modelo 3D da área de estudo realizado por meio do método de *krigagem* no *ArcScene 9.3* com o mapa de ASA sobreposto; B. Visualização do Modelo 3D confeccionado; C. Perfil das anomalias em profundidade nas direções indicadas na figura.

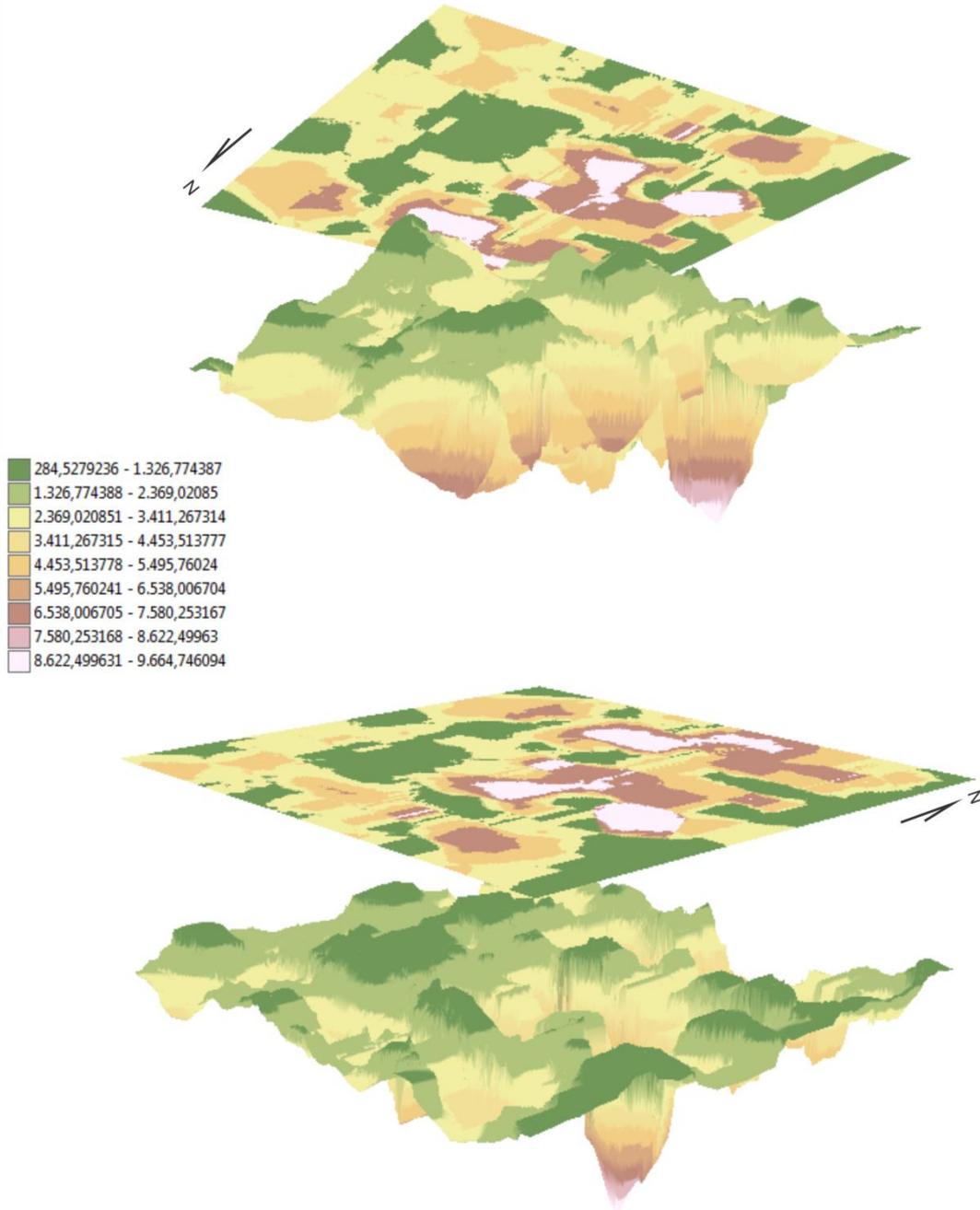


Figura 6.9. Visualização superior e inferior do modelo 3D da área estudada gerado por intermédio do método de krigagem no software ArcScene 9.3.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 INTRODUÇÃO

A sistemática adotada para a apresentação e discussão dos resultados obtidos foi concluída por meio do método intuitivo gráfico. Dessa maneira, a partir das análises interpretativas realizadas e da integração geológica geofísica tal metodologia consistiu, basicamente, na integração destas informações somadas aos principais controles da mineralização de esmeralda e água-marinha na região para a determinação de regiões potenciais para a ocorrência destes minerais-gemas. Foi então concluída, uma campanha de campo para a investigação das áreas pré-determinadas e conferência do modelo adotado. Dessa maneira, o presente capítulo visa explicar os resultados obtidos neste estudo a partir da integração geológica e geofísica bem como as considerações observadas em campo e as gêneses das variações gemológicas do berilo mais ocorrentes na região - esmeralda e água-marinha – que possibilitou produtos mais refinados acerca das prováveis áreas alvo para prospecção dessas gemas, também apresentadas nesta discussão.

7.2 DISCUSSÃO

A partir da análise integrada supracitada, definiu-se as áreas mais propensas para possível mineralização de esmeralda e água-marinha, tomando-se como premissa a gênese destas gemas e suas ocorrências na região de estudo. As áreas alvo foram delimitadas a partir da análise conjunta das respostas radiométricas, localização das anomalias presentes na quadrícula, fatores relativos à gênese das esmeraldas e sua ocorrência na região. Assim, foram determinadas anomalias radiométricas presentes em corpos ígneos (Suíte Borrachudos) e/ou em zonas de contato litológico entre rochas do Supergrupo Rio das Velhas ou rochas ricas em Fe, como os domínios do Grupo Serra da Serpentina, e esses corpos intrusivos. De maneira análoga, avaliou-se a possibilidade de ocorrência água-marinha a partir da observação dos dados gerados e apresentados nesta monografia, levando-se em consideração as premissas da ocorrência desta variedade do berilo na região, menos complexa em relação à esmeralda, e dependente, principalmente, da presença de corpos pegmatíticos pouco diferenciados. Assim, foram delimitadas áreas em que se caracteriza a presença de zonas hidrotermais no interior dos domínios das rochas da Suíte Borrachudos, que podem estar associados à presença de corpos pegmatíticos e, portanto, possuem potencial para ocorrência desta gema berilífera.

Dessa maneira, para a determinação das áreas potenciais para mineralização de água-marinha e/ou esmeralda, procurou-se observar entre outros fatores, a presença de zonas hidrotermalizadas. Portanto, aplicou-se o Mapa de Parâmetro F, ou Fator F, capaz de ressaltar áreas com enriquecimento

de potássio e urânio em relação ao tório (Figura 7.1). Essas regiões estão comumente relacionadas à concentração tardia desses elementos resultante de processos hidrotermais e, por isso, podem ser muito úteis na delimitação de regiões potenciais para mineralizações associadas a essas zonas hidrotermalizadas. Assim, o mapa de parâmetro F foi utilizado como base do mapa probabilístico e, dessa forma, foi possível identificar, com maior acurácia, áreas alvo para prováveis ocorrências esmeraldíferas associadas à presença de eventos hidrotermais a partir das anomalias de potássio, bem como a presença de água-marinha em corpos pegmatíticos, dispostas no mapa da Figura 7.2.

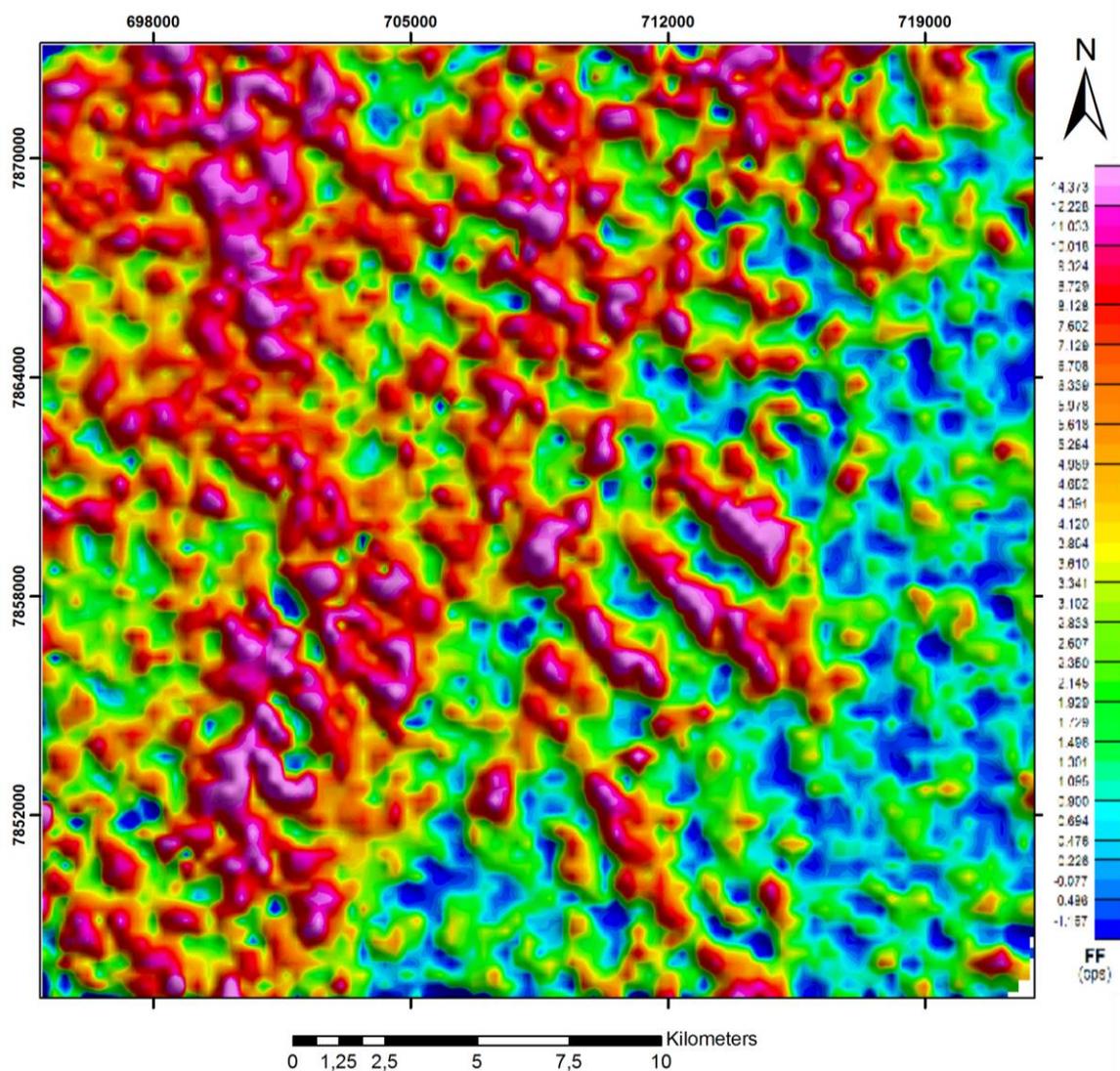


Figura 7.1. Mapa de Fator F.

No caso da esmeralda, a presença de zonas de contatos entre litologias detentoras de elementos cromóforos, como xistos e rochas ricas em Be foi o principal elemento analisado em conjunto com as anomalias do mapa de Fator F, que, ao indicar valores altos nessas zonas de contato,

indicam a possibilidade da interação entre esses elementos por meio de processos hidrotermais, e, assim, aumentando significativamente a possibilidade de ocorrência da esmeralda. De acordo com os dados geológicos da área, as regiões de contato entre o Supergrupo Rio das Velhas Indiviso, Grupo Nova Lima e Grupo Serra da Serpentina com as rochas dos granitoides da Suíte Borrachudos são de fato, zonas de interesse por apresentarem ambos, rochas ultramáficas e granitoides ricos em Be. Assim, foram selecionadas as áreas delimitadas pelas hachuras de cor verde como áreas potenciais de acordo com a resposta do Mapa de Parâmetro F na Figura 7.1.

Durante a identificação das regiões de interesse, observou-se que as áreas cartografadas como Complexo Guanhães, em sua maioria, são caracterizadas por altos valores de potássio (K) e apresentam, de maneira geral, um conjunto de respostas radiométricas que indicam composição muito próxima dos corpos pertencentes a Suíte Borrachudos. Contudo, as informações presentes nas notas explicativas das folhas Ipatinga e Conceição do Mato Dentro, além das descrições do Mapa Geológico de Minas Gerais não foram conclusivas, e, uma vez que a bibliografia menciona recorrentemente a presença de gemas berilíferas sempre relacionadas às rochas da Suíte Borrachudos, áreas inicialmente potenciais nos domínios do Complexo Guanhães não foram consideradas neste primeiro momento. No contexto das águas-marinhas o raciocínio foi semelhante, e como mostra a figura acima, as regiões de interesse ficaram limitas às áreas mapeadas como Corpo Açucena e Corpo Garcia, ambos pertencentes à Suíte Borrachudos e aflorantes na área de estudo.

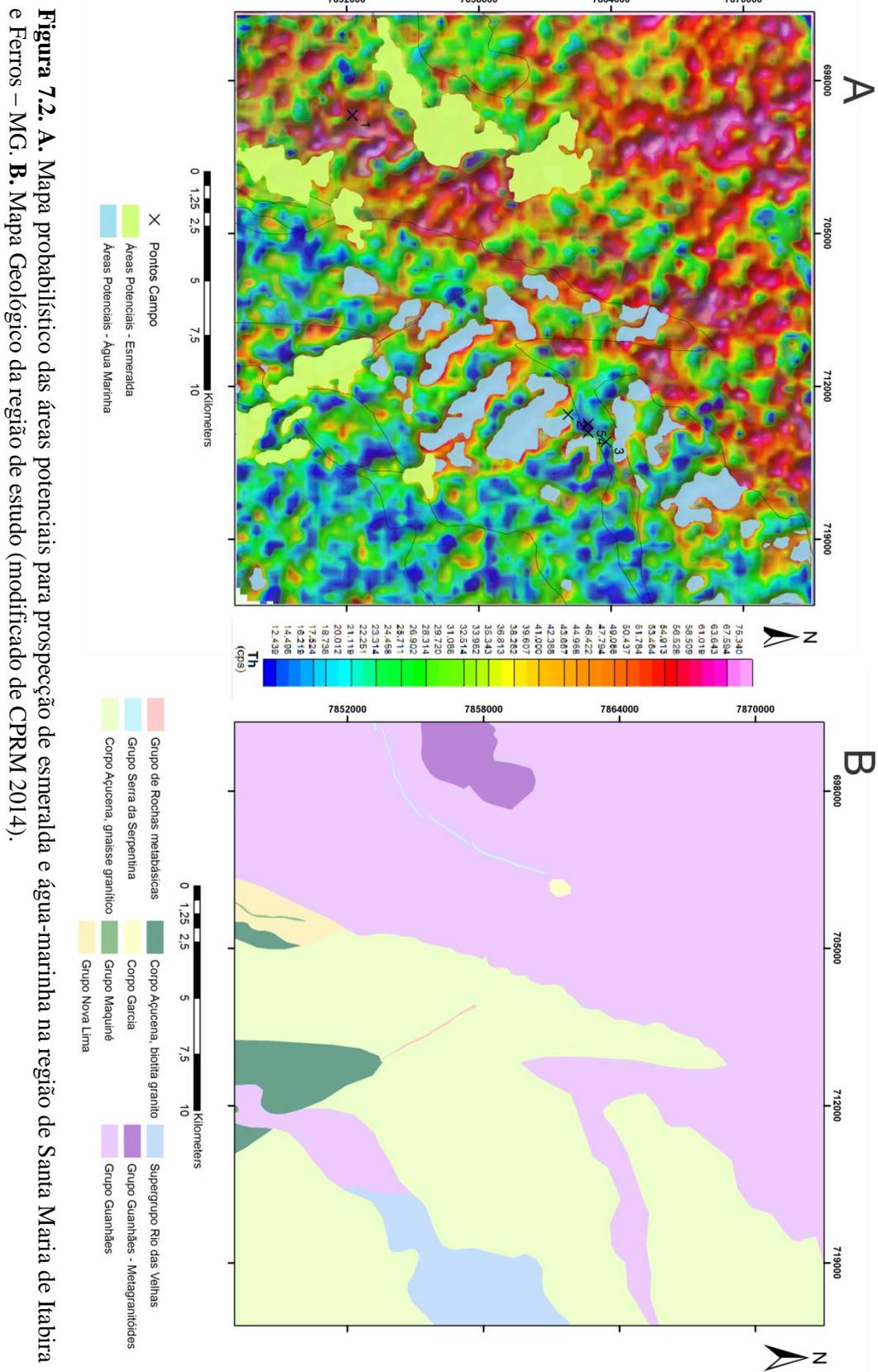


Figura 7.2. A. Mapa probabilístico das áreas potenciais para prospecção de esmeralda e água-marinha na região de Santa Maria de Itabira e Ferros – MG. **B.** Mapa Geológico da região de estudo (modificado de CPRM 2014).

7.3 CONSIDERAÇÕES DE CAMPO

Após o tratamento e interpretação dos dados apresentados nos capítulos anteriores e predefinição das áreas alvo apresentadas neste capítulo, foi realizado um campo, entre os dias 22 e 23 de julho. Este visou confirmar a potencialidade das áreas identificadas como áreas alvo na região investigada. Para tal, foram estudadas coordenadas estratégicas para a visita de campo de forma a comprovar as áreas de interesse previamente delimitadas, como mostra a Figura 7.2. Com base nos resultados da interpretação radiométrica e da correlação com as informações geológicas da área estudada, o mapa de Fator F foi utilizado como guia para determinação dos locais a serem visitados em campo, a partir das suas anomalias apresentadas. As possíveis presenças de eventos hidrotermais estão associadas às anomalias de mais altos valores presentes no mapa de Fator F dispostas neste mapa, e, dada a gênese das esmeraldas na região, essas zonas, quando relacionadas à ocorrência do granito da Suíte Borrachudos ligada a presença do flogopita xisto (rocha ultramáfica), mostram-se como áreas de interesse para a ocorrência de depósitos esmeraldíferos.

Foram visitados dois locais no dia 22 de julho (pontos 1 e 2 no mapa da Figura 7.2), sendo o primeiro, na região de Santa Maria de Itabira, escolhido para caracterização de áreas com grandes indícios de zonas hidrotermalizadas associadas às rochas do Grupo Guanhões, até então caracterizadas genericamente como rochas supracrustais vulcânicas e sedimentares nos trabalhos de Grossi-Sad *et al.* (1989,1990). Desse modo, observou-se nesse ponto (UTM 0699601/7852240) que, a litologia presente no primeiro ponto visitado é muito similar ao granitoide Borrachudos possuindo as mesmas características petrográficas que o mesmo. Em relação aos mapas temáticos gerados, a região do ponto visitado apresenta enriquecimento em relação ao radioelemento potássio e é pouco enriquecida em urânio e tório. Nesse mesmo ponto aflora, pontualmente, o flogopita xisto em contato com o Grupo Guanhões (Figura 7.3). A presença do xisto ultramáfico está associado à presença de uma falha de empurrão observada em campo a partir do seu plano de falha- N22E/25SE - com estrias e *steps* (Figura 7.4) que indicam o plano de falha e sentido de movimento que caracteriza uma falha de empurrão. Ressalta-se que a ocorrência de esmeralda na mina Belmont, em Nova Era, possui a mesma orientação (N20E/30SE). Também foi observada em campo a presença de micas e promelana (manganês), o que é um indício de hidrotermalismo (Figura 7.5), o que condiz com a presença da falha encontrada neste afloramento. Assim, caracterizam-se nesse ponto todos os pré-requisitos necessários para a mineralização da esmeralda, como mostra a figura (Figura 7.4).

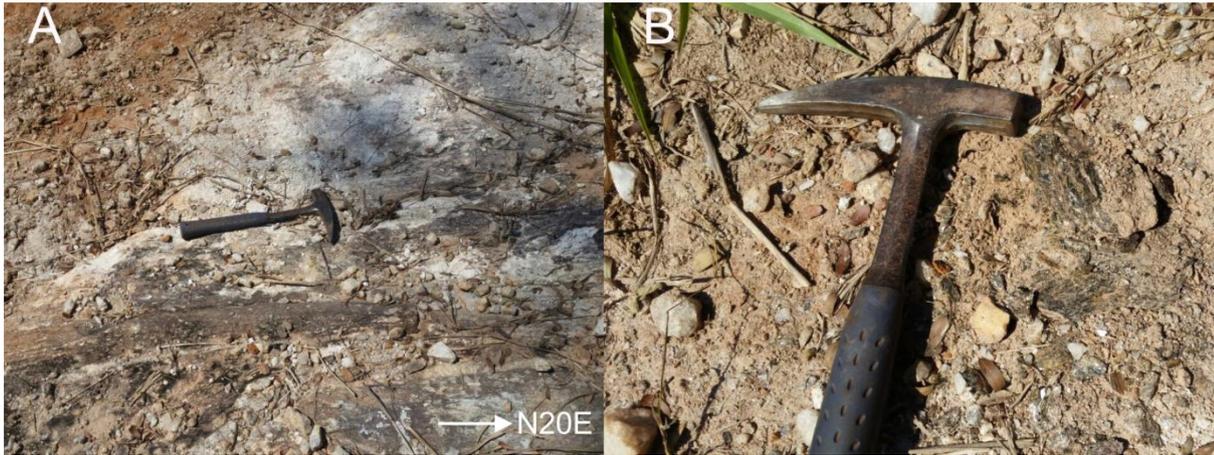


Figura 7.3.A. Flogopita xisto em contato com o granitoide do Grupo Guanhões aflorante no ponto 1, direção de continuação deste corpo rochoso foi tirada em N20E; **B.** Xisto aflorante.



Figura 7.4. Fotografia tirada no ponto 1 para caracterizar *steps* de falha observados no plano de falha, mostrando o sentido indicado pela seta, configurando falha de empurrão.



Figura 7.5.A. Quartzo leitoso; B. Quartzo com óxido de manganês – psomelana.

Já o segundo ponto (UTM 0713319/7862052), localizado na porção nordeste da quadrícula, nos arredores de Ferros, é caracterizado por uma zona de contato entre as rochas do Corpo Açucena e do Grupo Guanhões. Nesse ponto, observou-se na base de um pão de açúcar de granitoide maciço (Suíte Borrachudos) a curiosa ocorrência de cristais de granadas que chegam a 10cm de diâmetro (Figura 7.6). Esses cristais ocorrem mineralizados em uma camada de xisto que varia entre 1 e 2 metros de espessura. Ainda que o estudo deste mineral do grupo das granadas não seja alvo deste estudo, sua presença e abundância fomentou a curiosidade acerca dessa ocorrência pouco usual, muito provavelmente associada a metamorfismo de contato de médio a alto grau.



Figura 7.6. Granadas aflorantes no ponto 2 da visita de campo realizada entre os dias 22 e 23 de julho.

No afloramento em questão, observou-se uma associação petrográfica característica, constituída não só da granada, mas também da biotita (termo petrográfico), cordierita e um possível anfibólio escuro com hábito radial e clivagem característica (ângulo de 56°), observados em campo, como mostra a Figura 7.7. Além do afloramento visitado, dizem os moradores da região que há outras ocorrências na área, com as mesmas características, mas com afloramentos alongados cobrem aproximadamente 3.000m de extensão, o que torna essa ocorrência ainda mais intrigante, uma vez que a granada no afloramento visitado possui potencial gemológico (Figura 7.8).



Figura 7.7. **A.** Granadas *insitu* em associação com anfibólio, biotita e cordierita; **B.** Imagem de detalhe mostrando a ocorrência da cordierita e granada lado a lado (rocha *insitu*); **C.** Amostra do afloramento visitado com destaque para o tamanho das granadas mineralizadas no xisto. **D.** Granadas e anfibólio com hábito radial.



Figura 7.8. Granadas lapidadas provenientes do afloramento visitado (ponto 2).

Já no segundo dia de campo, foram visitados outros 3 pontos (pontos 3,4 e 5), nos arredores de Ferros, visando-se validar o modelo aplicado para a delimitação das áreas potenciais para água-marinha. Dessa maneira, visitou-se uma ocorrência de água-marinha recém-descoberta, bem como antigas cavas nos arredores desse pequeno garimpo (Figura 7.9). De fato, foi possível constatar a presença de cristais de água-marinha de coloração azul, retirados durante a visita. A ocorrência das águas marinhas na região visitada está associada a um corpo pegmatítico aflorando há menos de 0,5m da superfície. Este se encontra situado no alto de um “morro pelado” ou “rolador”, denominado assim pelos habitantes da área, devido à ausência de cobertura vegetal e predomínio de cascalho, que torna o terreno ainda mais escorregadio.



Figura 7.9. A. Garimpo recém-descoberto (ponto 3); B. Antiga cava produtora de águas marinhas (ponto 4).

Na região visitada, notou-se uma presença significativa de hematita, normalmente presente em pequenos grãos componentes do cascalho em superfície, o que é importante pois explica o aumento relativo da susceptibilidade magnética nos mapas magnetométricos quando comparados a usual resposta relativa aos domínios da Suíte Borrachudos (Figura 7.10). Além disso, pode-se dizer que a abundância do ferro explica o fato das gemas extraídas nesta região apresentarem tons fortes de azul, e, de fato, a riqueza em ferro (Fe^{2+}) está associada à cor azul das águas marinhas. Também foram observados uma quantidade expressiva de grãos de quartzo fumê de tamanhos variados e mica branca (muscovita), com algumas amostras chegando até 20cm de comprimento, típicos de pegmatitos. Assim, a presença deste garimpo nos arredores das áreas previamente delimitadas como área alvo foi essencial para a comprovação do modelo utilizado e de sua efetividade.

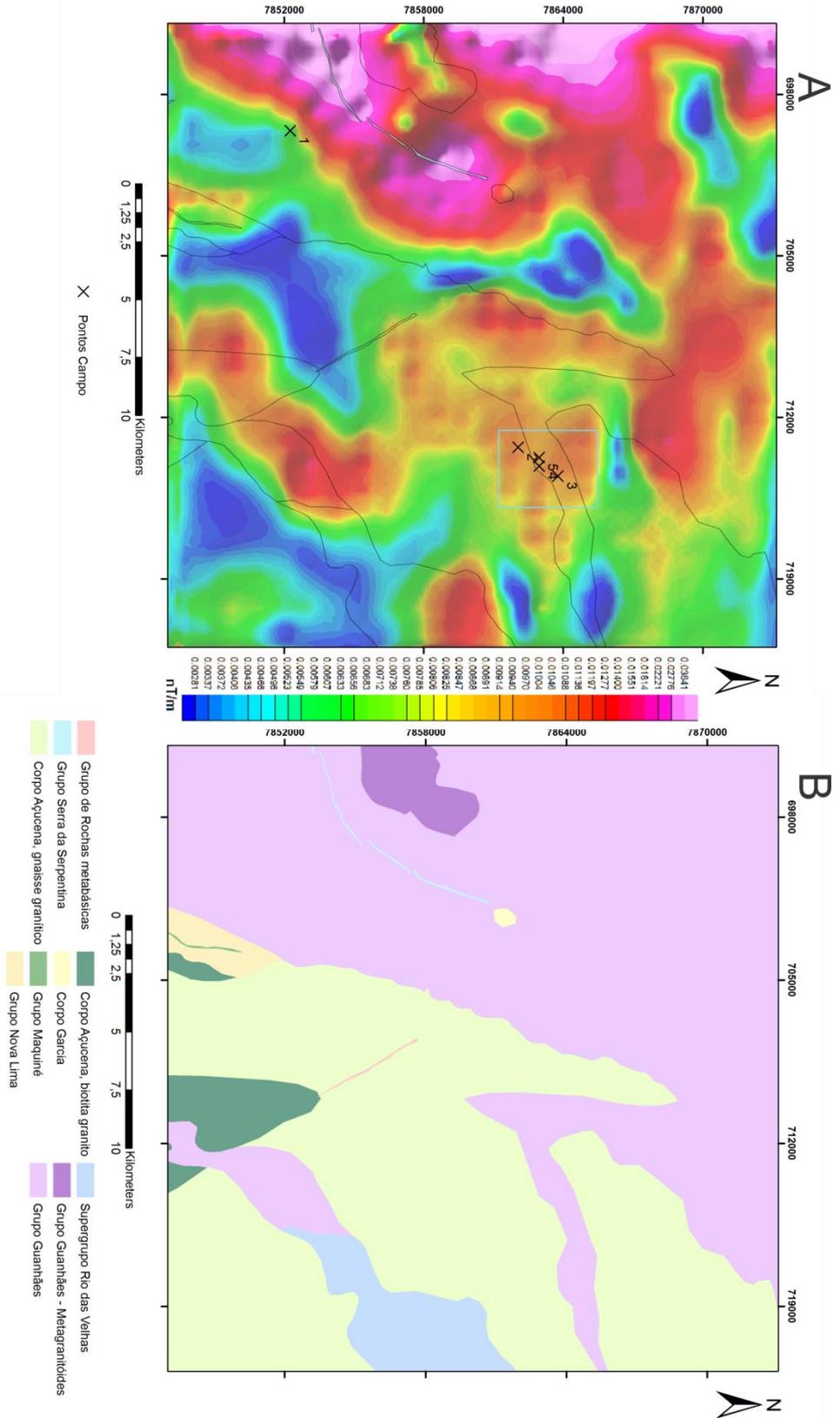


Figura 7.10.A. Mapa de Amplitude e Sinal Analítico sobreposto pelos contatos litológicos e pontos de campo visitados com destaque para o polígono azul. **B.** Mapa Geológico da área de estudo para referência (modificado de CPRM 2014).

7.4 REGIÕES DE INTERESSE

Uma vez realizado o campo e verificado a potencialidade das áreas traçadas foi concluído um mapa final das áreas potenciais presente na região de estudo. Principalmente com relação à ocorrência de esmeralda, pode-se observar que a presença de rochas ultramáficas, no caso o flogopita-xisto, é local. Trata-se de corpos limitados e pouco expressivos se comparado à escala de mapeamento da CPRM, em que a média é um afloramento a cada 1000m, e, portanto, se mostra insuficiente para cartografar tais corpos. Somado a isso, verificou-se em campo a similaridade entre os granitoides pertencentes ao Corpo Açucena e aqueles do Grupo Guanhães, o que aumenta a possibilidade de depósitos esmeraldíferos, caso se verifique a ocorrência deste xisto em contato com o granitoide. Contudo, devido ao tamanho da área de estudo e o difícil acesso de algumas regiões, não foi possível abranger uma região maior na visita de campo efetuada. Assim, ainda que tenha sido verificada a incongruência entre a escala de mapeamento do banco de dados geológico e a presença do flogopita-xisto, as possíveis áreas potenciais situadas nos domínios do Grupo Guanhães foram delimitadas como regiões de interesse secundárias, nas quais é preciso realizar melhor investigação geológica para uma determinação mais precisa da sua potencialidade, tanto em relação a possível presença de esmeralda quanto água-marinha (Figura 7.11).

De maneira similar, pode-se observar que os corpos pegmatíticos associados à ocorrência de água-marinha são em sua maioria corpos pequenos, pouco diferenciados, e, como já foi discutido por Marciano (1995), são pobres em lítio (Li) e normalmente enriquecidos nos seguintes elementos: Be, Nb e Y. Geralmente, são abundantes em muscovita. Dessa forma, quando não aflorantes, sua identificação por meio do método intuitivo gráfico utilizado é dificultada, pois, os dados magnetométricos que mostram as respostas em subsuperfície não mostra o contraste entre os corpos pegmatíticos e as rochas pertencentes à Suíte Borrachudos, uma vez que as mesmas apresentam valores similares de susceptibilidade magnética e, os dados radiométricos são muito superficiais, com penetrabilidade de poucos centímetros. Dessa maneira, visando a melhor maneira de tentar delimitar esses corpos utilizou-se da análise radiométrica em conjunto com a geologia para identificar regiões com indícios de hidrotermalismo (Figura 7.11), e a partir disso, sugere-se uma investigação de detalhe. Por isso, para melhor delimitação destes corpos, sugere-se a realização de um mapeamento de detalhe.

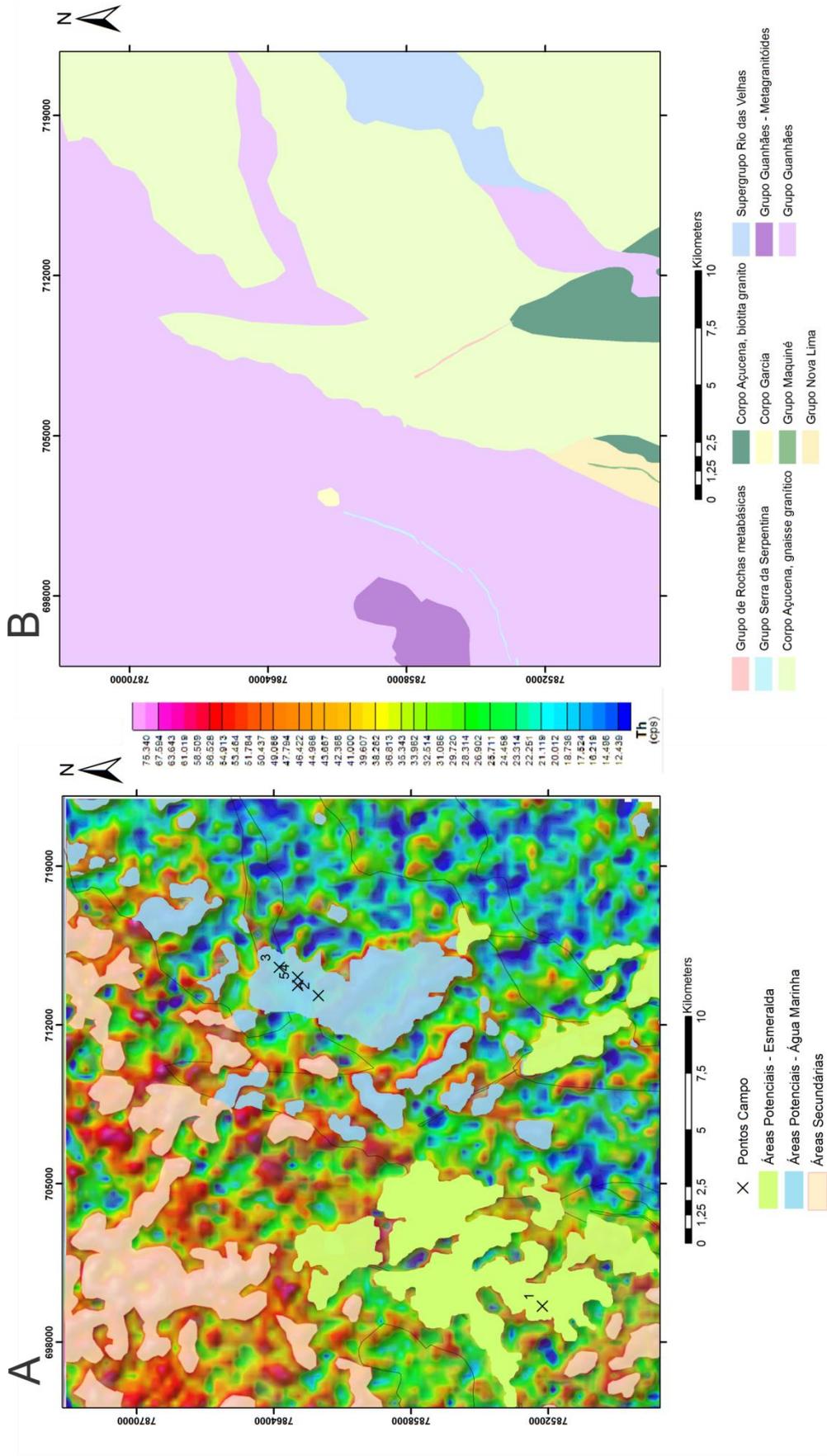


Figura 7.11. A. Mapa probabilístico das áreas potenciais para ocorrência de esmeralda e água-marinha e áreas de interesse secundárias e Mapa de Fator F como (*background*); **B.** Mapa Geológico da região de estudo (modificado de CPRM 2014).

Assim, com o objetivo de elucidar a profundidade das anomalias identificadas inseridas nas regiões potenciais delimitadas, confeccionaram-se dois mapas, sendo o primeiro com o *background* dos resultados da Deconvolução de Euler em planta (Figura 7.12.A) e o segundo com o Mapa Geológico da área de estudo para referência (Figura 7.12.B). É possível observar que a maioria das áreas potenciais delimitadas na região oeste da área investigada, apresentam as mais rasas anomalias estimadas. E, conseqüentemente, as anomalias presentes na porção leste, possuem profundidades estimadas maiores, com exceção da região nordeste da quadrícula, próximo ao ponto 3 visitado em campo, que possui anomalia tão rasa quanto aquelas associadas às áreas potenciais para prospecção de esmeralda na região sudoeste da área de estudo. Tais profundidades estão associadas a magnetização das rochas em subsuperfície, e, de fato, é possível verificar que o domínio oeste da área em questão possui maiores valores magnetométricos que o domínio leste a partir do mapa de ASA (Figura 7.10).

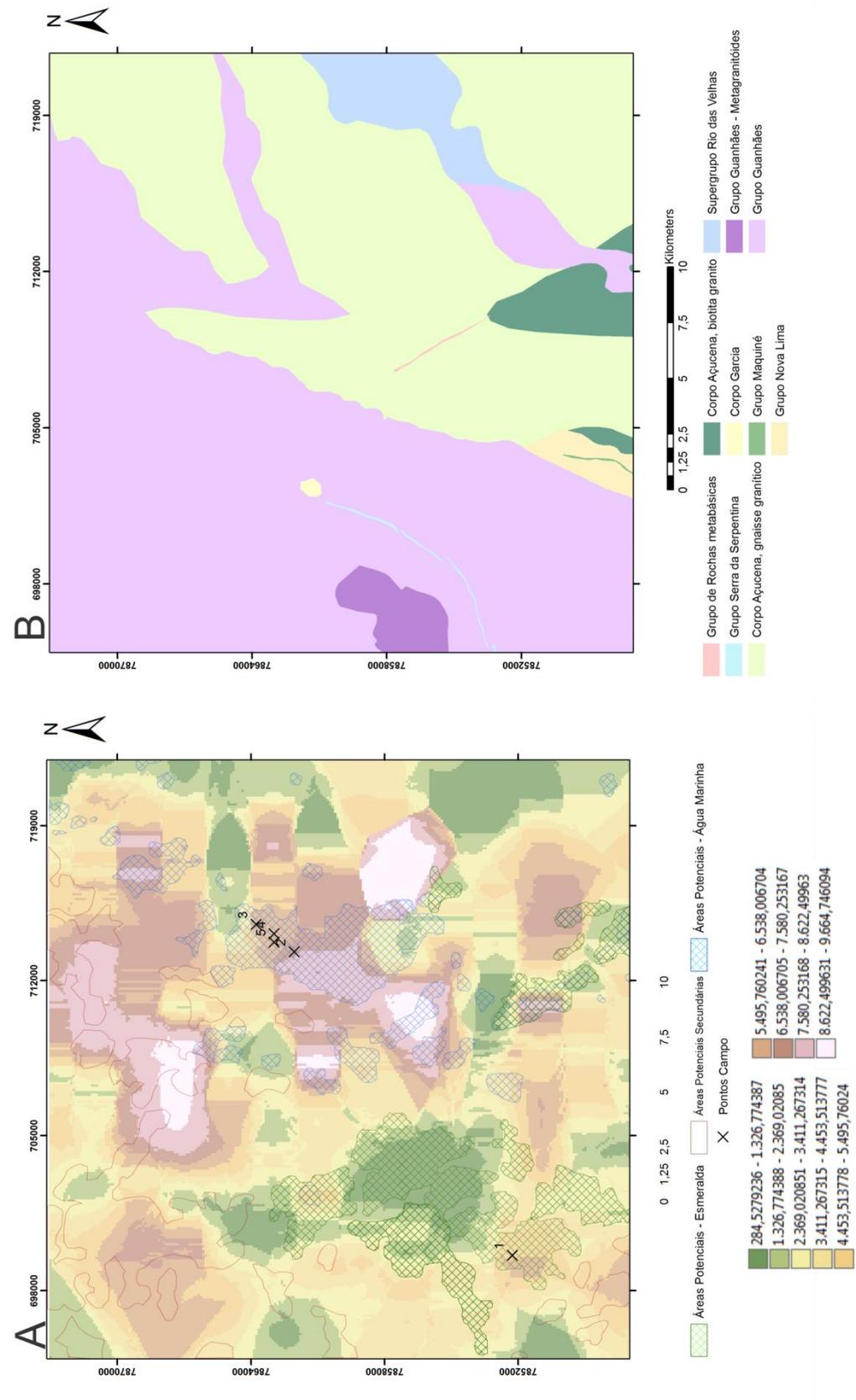


Figura 7.12. A. Mapa Probabilístico com *background* dos dados da Deconvolução de Euler, em planta, com as profundidades estimadas apresentadas pela escala de cor (metros); B. Mapa Geológico da área de estudo (modificado de CPRM 2014).

CAPÍTULO 9

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando o principal objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso – a identificação de áreas potenciais para prospecção destas gemas por intermédio de um estudo geológico e geofísico integrado e do método intuitivo gráfico – o método aplicado foi essencial para as análises dos fatores controladores da mineralização de esmeralda e água-marinha na região estudada. As técnicas aplicadas foram úteis para a identificação de litotipos e delimitação de contatos geológicos, assim como possíveis zonas hidrotermalizadas associadas à cisalhamentos e/ou descontinuidades capazes de permitir a interação dos fluidos provenientes do granitoide Borrachudos, ricos em Be, e daqueles provenientes das rochas ultramáficas, flogopita xisto, ricos em cromóforos, no caso da esmeralda. Similarmente, os altos valores de potássio associados aos indícios de hidrotermalismo nos domínios dos corpos Açucena e Garcia, foram fatores controladores para determinação das áreas potenciais para possível mineralização da água-marinha, associada a corpos pegmatíticos em associação à Suíte Borrachudos.

A partir do Mapa de Parâmetro F foi possível observar com mais clarezas as possíveis zonas hidrotermalizadas, essenciais no contexto geológico necessário para a mineralização destas gemas. Os lineamentos interpretados também atuaram como fator importante, pois sugerem zonas de cisalhamento que, quando associadas às zonas hidrotermalizadas e possíveis zonas de contatos entre os granitos da Suíte Borrachudos e as possíveis rochas ultramáficas - identificados a partir do conjunto dos mapas gerados e principalmente a partir da imagem ternária e do Mapa do Canal de Th e em subsuperfície, Mapa de ASA - compõem o quadro ideal para um possível depósito esmeraldífero.

A análise dos mapas de contagem dos canais de K, U, Th, CT (contagem total) e da imagem ternária, possibilitou a delimitação de três principais unidades radiométricas ou radiofácies que, quando comparadas ao mapa geológico da área, apresentam-se em harmonia, devido ao caráter litófilo dos radioelementos (K, U e Th). Dessa forma, os granitos da Suíte Borrachudos apresentam baixas concentrações de K, e enriquecimento em U e Th. O Grupo Guanhães, apresenta altos teores de U e Th, com porções de baixa concentração de radioelementos assim como valores intermediários de K. Já as rochas do Supergrupo Rio das Velhas (Rio das Velhas Indiviso, Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné) possuem respostas nas quais se observa altos teores de K, U e Th bem como um predomínio de enriquecimento de K.

Uma vez que o flogopita xisto foi observado em corpos aflorantes pouco extensos, não foi possível determinar um padrão de comportamento para tal litologia. De maneira geral, espera-se que o

mesmo esteja associado a baixos valores relativos de Th e U, e maiores concentrações de potássio, principalmente devido sua ocorrência associada a zonas hidrotermalizadas, quando associadas a zonas de falhas são grandemente favoráveis à mineralização de esmeraldas na região de estudo, por isso, a análise integrada entre litologia e aspectos estruturais é tão importante e necessária.

Paralelamente, o estudo magnetométrico possibilitou uma análise de subsuperfície acerca dos aspectos estruturais e da magnetização das rochas em profundidade. Nesse caso, o mapa de ASA foi estratégico para a delimitação dos lineamentos mais evidentes e das regiões de mais intensa magnetização na área estudada, para a delimitação de corpos possivelmente relacionados às rochas ultramáficas e, portanto, de maior susceptibilidade magnética.

De maneira geral, a análise estrutural realizada por meio do método magnetométrico mostrou que há uma forte associação entre as estruturas interpretadas a partir dos dados magnetométricos, radiométricos e os contatos geológicos presentes na região investigada. Observa-se também que muitas das relações de contato na área de estudo estão associadas aos lineamentos interpretados a partir dos dados geofísicos. Assim, pode-se concluir que essas relações de contato devem estar associadas a aspectos tectônicos, primordiais para a ocorrência da esmeralda se, nesse caso houver hidrotermalismo associado.

Já a aplicação da Deconvolução de Euler no mapa de ASA foi essencial para a visualização das anomalias em 3D. Contribuindo assim para a interpretação dos aspectos estruturais e profundidades das anomalias presentes, bem como as possíveis zonas de cisalhamento e falhamentos possivelmente associados às mineralizações, direta ou indiretamente.

Dessa forma, visando à ocorrência de esmeralda e, tomando-se como premissa o seu controle lito-estrutural, recomenda-se um mapeamento de detalhe (1:10.000 até 1:5.000 nas regiões previamente delimitadas como potenciais) para melhor entendimento litológico e estrutural, assim como as relações de contato estabelecidas na área investigada. O conhecimento geológico é primordial para uma interpretação apropriada e, quanto maior acervo de dados geológicos, melhores serão os resultados do modelo aplicado. De maneira similar, o mapeamento de detalhe se torna necessário para investigação das áreas potenciais para ocorrência de água-marinha, pois estas estão associadas à presença de corpos pegmatíticos. A delimitação e caracterização destes corpos durante a campanha de mapeamento pode ser ainda mais efetiva se foi feito o uso da espectrometria durante a execução do mapeamento de detalhe. Por fim, em ambas as áreas potenciais definidas, tanto para possíveis depósitos esmeraldíferos quanto para os depósitos de águas marinhas, recomenda-se a execução de análise química dos solos, caracterização mineralógica por meio de estudos petrográficos e análises mineralógicas a partir da combinação de difratometria de raios x e microscopia eletrônica de varredura no modo EDS. A execução das análises supracitadas visa refinar os resultados obtidos nesta

monografia, contribuindo para uma determinação mais precisa da geometria dos possíveis corpos de interesse, além de contribuir para maior redução de custos da pesquisa. Assim, uma vez realizadas às investigações sugeridas, deve-se fazer uso de furos de sondagens nas áreas de maior probabilidade para estimar assim, teor, profundidade dos corpos e estimativa da geometria dos mesmos.

Pode-se afirmar que este Trabalho de Conclusão de Curso cumpriu seu objetivo, uma vez que identificou o potencial da área estudada, bem como as áreas mais favoráveis para a ocorrência da esmeralda e da água-marinha. Além disso, os dados obtidos a partir do modelo teórico desenvolvido nesta monografia obtiveram correlação muito semelhante com as informações obtidas durante o campo realizado, que inclusive, identificou um garimpo ativo de água-marinha próximo às regiões identificadas como área potencial para esta gema previamente ao campo realizado.

Horta, L.F.C. 2017. Estudo Geológico e Geofísico da região de Santa Maria de Itabira e Ferros, Minas Gerais...

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida-Abreu P. A. & Pflug R. (1994). The geodynamic evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H1/2*, p. 21-44.
- Almeida F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Rev. Bras. de Geociências*, 7: 349-364.
- Brown, G. 1993. Maxixe-type beryls: ghosts from the past. *Australian Gemmologist*, 18(7):215-221.
- Castañeda C., Addad J. E., Liccardo A. 2001a. Gemas de Minas Gerais: Esmeralda, Turmalina, Safira, Topázio, Quartzo, Água-marinha, Alexandrita. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia / Núcleo Minas Gerais. 284p.
- Cerný P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. *Geoscience Canada*, 18, 49-67.
- César-Mendes, J. 1989. Aspectos mineralógicos, geológicos e econômicos das esmeraldas de Santa Terezinha de Goiás. USP, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 163p.
- César-Mendes, J. 2000. History of the brazilian esmeral findings. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, Field Trip Guide, 58p.
- Chemale Jr. F. 1987. Gênese das rochas graníticas do tipo Borrachudos. In: CONGR. BRAS. GEOQ., 1, 1987, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: Soc. Bras. Geol., 1987, p.171-186.
- CPRM. 2014. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais.
- Correia Neves J.M, Pedrosa Soares A.C., Marciano V. R. P. R. O. 1986. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1):106-118.
- Delaney P. J. V. 1996. Gemstone of Brazil – geology and occurrences. Ouro Preto, Editora REM. 125p.
- Dentith M., Mudge S.T. 2014. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press, p. 454.
- Dickson B.L. & Scott K.M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO J. Aust. Geol. & Geophys.*, 17(2): 187-199.
- Dorr J.V.N. & Barbosa L.M. 1963 . Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil. *US Geol. Surv. Prof. Pap.* 341-C, 110 p. Washington.
- Dorr J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A.
- Dossin T.M. 1985. Geologia e geoquímica das formações ferríferas da Serra da Serpentina, Conceição do Mato Dentro, MG. Tese de Mestrado, UnB, 140 p.
- Dussin I. A. 1994. Evolution Structurale de la Region de L'Espinhaço Meridional, Bordure Sud-Est du Craton San Francisco - Brésil. Tectonique Superposées au Proterozoïque. L'Université D'Orléans, Orléans. (Tese de Doutorado).
- Endo I. 1997. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozoico no Interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Adjacências, Minas Gerais. Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 243p.
- Favacho M. 2001. Quartzo. In: Castaneda C., Addad J. E., Liccardo A. Gemas de Minas Gerais: Esmeralda, Turmalina, Safira, Topázio, Quartzo, Água-marinha, Alexandrita. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia / Núcleo Minas Gerais, 200-233.
- Franz G., Gilg H. A., Grundmann G., Morteani G. 1996. Metassomatism at a granitic pegmatite – dunit contact in Galicia: the Franqueira occurrence of crisoberyl, esmerald, and phenakite: discussion. *Cann. Mineral.* 34: 1329-1331.

- Horta, L.F.C. 2017. Estudo Geológico e Geofísico da região de Santa Maria de Itabira e Ferros, Minas Gerais...
- Gandini A. L. 1999. Aspectos da Mineralogia, Geoquímica, Gênese e Potencialidade Econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese – Doutorado, 261p.
- Garibaldi E. 1994. Ocorrências gemológicas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Real, 116p.
- Geomag. 1996. Levantamento Aéreo Manométrico e Gamaespectrométrico – Projeto Gemas de Minas Gerais, Convênio DNPM/CPRM.DNPM. 1996. V. 1 (Relatório Final).
- Giuliani G. & Couto P. 1988a. O metassomatismo de infiltração e sua importância nos depósitos de esmeralda do Brasil. In: Congresso Latinoamericano de Geologia, 7, Belém (PA), Anais. 1:459-475.
- Giuliani G., Silva L.J.H.D., Couto P. 1990. Origin of emerald deposits of Brazil. *Mineral Deposita*. 25:57-64.
- Gouvêa L. J. & Costa e Silva L. M. 1995. Prospecção Geofísica. Belém, PA, Universidade Federal do Pará. 311p.
- Grossi Sad J:H., Magalhães J.M.M., Carelos P.M. 1989. Geologia do Distrito de Guanhães, Minas Gerais. Belo Horizonte. Relatório Interno DOCEGEO-GEOSOL, 252p.
- Grossi-Sad J.H., Chiodi-Filho C., Santos J.F., Magalhães J.M.M., Carelos P. 1990. Duas suítes graníticas do bordo sudeste do cráton Sanfranciscano, em Minas Gerais: petroquímica e potencial metalogenético. In: Anais do 36º Cong. Bras. Geol., 36. Anais 4: 1836-1848.
- Grossi-Sad J. H., Mourão M. A. A., Guimarães M. L. V. & Knauer L. G. 1997. Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro – SE.23-Z-D-I. In: Grossi-Sad J. H., Lobato L. M., Pedrosa-Soares A. A. C. & Soares-Filho B. S. (coordenadores e editores). Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 2533-2693.
- Herz N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - US Geol. Surv., Prof. Pap. 641- B, 58 p., Washington.
- Infojoia 2017. Entrevista com Walter Martins Leite Disponível em: http://www.infojoia.com.br/news_portal/noticia_11689. Acessado em 21 de jul de 2017.
- Kearey P., Brooks M. & Hill I. 2009. Geofísica de Exploração. Tradução de Coelho M. C. M., São Paulo. 262p.
- Klein C. & Hurlbut Jr. C.S. 1993. *Manual of mineralogy (after James Dana)*. 21th ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 596p.
- Laurs B. M., Dilles J. H., Snee L. W. 1996. Emerald Mineralization and metassomatism of amphibolite. Khataro granitic pegmatitic – hydrothermal vein system, Haramosh Mountain, northern Pakistan. *Cann. Mineral.* 34: 1253-1286.
- Liccardo A. 2007. Turismo mineral em Minas Gerais, Brasil. *Global Tourism*, 3 (2): 1-19.
- Machado N. & Noce C.M. 1993. A evolução do Setor Sul do Cráton São Francisco entre 3,1 2 0,5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: Simp. Cráton São Francisco, 2. Salvador, 1993. Anais...Salvador, SBG-BA, SE/SBG. p.100-102.
- Marciano V. R. P. R. O. 1995. O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG: mineralogia, geoquímica e zoneografia. USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 216p.
- Marshak S. & Alkmin F. F. 1989. Proterozoic Contraction/ Extensional Tectonics of the Southern São Francisco Region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8, 3: 555-571.
- Mindat 2017. Imagens de variedades gemológicas do berilo. Disponível em: <http://www.mindat.org>. Acessado em 21 de jul de 2017.
- Moxham R. M. 1963. Natural radioactivity in Washington County, Maryland. *Geophysics*, 28: 262-272.
- Nalini Jr. H. A. Caractérisation des suites magmatiques néoproterozoïques de la region de Conselheiro Pena et Galiléia (Minas Gerais, Brésil). Etude géochimique et structurale des suites Galiléia et Urucum et relations avec les pegmatites à éléments rares associées. Paris: Ecole des Mines de Saint Etienne et Ecole des Mines de Paris, 1997. 237p. (Tese de Doutorado).

- Newman Fernández J. A. 2004. Integração de Dados Geológicos e Geofísicos para Seleção de Áreas Alvos para a prospecção de Esmeralda na Folha Itabira, Minas Gerais – Ouro Preto. Dissertação de mestrado, DEGEO/UFOP, 192 p.
- Noce C. M. 1995. Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 128p.
- Noce C. M., Teixeira W., Quéméneur J. J. G., Martins V. T. S., Bolzachini E. 2000. Isotopic signatures of Paleoproterozoic granitoids from the southern São Francisco Craton and implications for the evolution of the Transamazonian Orogeny. *South American Earth Sciences*, 13: 225-239.
- Oliveira A. A. K., Leite C. A. S. 2000. Projeto Leste: Folha Ipatinga – SE.23-Z-D-II, escala 1:100.000. Belo Horizonte, SEME, COMIG, CPRM.
- Oliveira A. A. K. 2002. Estruturação e alteração metassomática e alteração metassomática do ortognaisse açucena (Suíte Borrachudos) na região de Ipatinga, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 90p.
- Pedrosa-Soares A.C., Dardenne M.A., Hasui Y., Castro F.D.C., Carvalho M.V.A., Reis A.C. 1994. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, Brazil, Companhia Mineradora de Minas Gerais.
- Pedrosa-Soares A. C., Noce C. M., Vidal P. H., *et. al.* 1992 a. Discussão sobre o novo modelo tectônico para a Faixa Araçuai – Oeste Congolesa. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v.45, n.1/2, p.38-40.
- Pedrosa-Soares A. C., Noce C. M., Vidal P. H., *et. al.* 1992b. Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuai (SE Brazil) – West Congolian (SW Africa) Belt. *Journal of South America Earth Sciences, Oxford*, v.6, n.1/2, p. 33-47.
- Pedrosa Soares A. C., Noce C. M., Wiedemann C., Pinto C. P. 2001a. The Araçuai-west-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, 110: 307-323.
- Pedrosa Soares A.C., Pinto C.P., Netto C., Araujo M.C., Castaneda C., Achtschin A. B., Basílio M.S. 2001b. A Província Gemológica Oriental do Brasil. *In: Castaneda C., Addad J.E., Liccardo A. (eds). Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia-Núcleo Minas Gerais, p16-33.
- Pedrosa-Soares A. C., Vidal P., Leonardos O. H., *et al.* 1998b. Neoproterozoic oceanic remnants in Eastern Brazil: Further evidence and refutation of an exclusively ensialic evolution for the Araçuai – West Congo Orogen. *Geology, Boulder*, n. 26, p. 519-522.
- Pires A. C. B. & Harthill N. 1989. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixas-Itapaci area, Goiás, Brazil. *Geophysics*, 54: 1326-1332.
- Proctor K. 1984. Gem pegmatites of Minas Gerais, Brazil: exploration, occurrence, and aquamarine deposits. *Gems & Gemology*, 20(2):78-100.
- Reid A. B., Allsop J. M., Granser H., Millet A. J., Somerton I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55: 80-91.
- Sauer J.R. 1982. Berilos. *In: Brasil, paraíso de pedras preciosas*. São Paulo, Gráfica Editora Hamburg. P. 19-34.
- Schumann W. 1995. *Gemas do Mundo*. 8ª ed. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico Indústria e Comércio Ltda. 254p.
- Schwarz D. 1987. A mineralogia do berilo e da esmeralda. *In: Esmeraldas: inclusões em gemas*. Ouro Preto. Imprensa Universitária da UFOP. P.3-58.
- Schwarz D & Giuliani G. 2001. Emerald Deposits: A Review. *The Austr. Gemol.* **21**(1):17-23.
- Schwarz D. & Schmetzer J. 2001. Emerald and green beryl from Brazil. *J. Gemmol.*, **25**:117-141.
- Silva S. L. 1997. Projeto Leste: Folha Santa Maria do Suaçuí – SE.23-Z-B-III, escala 1:100.000. Belo Horizonte, SEME, COMIG, CPRM. .v.7.
- Silva S. L. 2000. Projeto Leste: Folha Coronel Fabriciano – SE.23-C-D-V, escala 1:100.000. Belo Horizonte, SEME, COMIG, CPRM.

- Horta, L.F.C. 2017. Estudo Geológico e Geofísico da região de Santa Maria de Itabira e Ferros, Minas Gerais...
- Souza J. L. de 1988. Mineralogia e geologia da esmeralda da Jazida de Itabira, MG. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, Teste de Mestrado, 192 p.
- Souza J. L., César-Mendes J., Svisero D. P. 1987. Aspectos mineralógicos e geológicos das esmeraldas brasileiras. Revista Escola de Minas, 40(3) 18-26.
- Teixeira W. 1985. A Evolução Geotectônica da Porção Meridional do Cráton São Francisco com base em Integração Geocronológica. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 207p.
- Teixeira W. 1993. Avaliação do acervo de dados geocronológicos e Isotópicos do Cráton do São Francisco. Implicações tectônicas. *In*: Dominguez J. M. L. & Misi A. (ed.) O Cráton do São Francisco. Salvador. SBG/SGM, 1: 11-33.
- Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Keys D. A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University. 770p.
- Thomas J. E. 2001. Fundamentos de Engenharia do Petróleo. Rio de Janeiro, Editora Interferência. 271p.
- Thompson D. T. 1982. EULDPH. A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics, 47: 31-37.
- Uhlein A. & Trompette R. 1992. A evolução de um rift intracontinental para uma margem continental passiva: o exemplo da faixa de dobramentos Araçuaí (MG). *In*: SBG, Congr. Bras. Geol., 37, São Paulo, Anais, 1: 293.

