



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO
SÍTIO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Elis Figueiredo Oliveira

MONOGRAFIA nº 365

Ouro Preto, julho de 2020

**CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DO LINEAMENTO
CÓRREGO DO SÍTIO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière 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. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 365

**CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA DO LINEAMENTO
CÓRREGO DO SÍTIO, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**

Elis Figueiredo Oliveira

Orientadora

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

Coorientador

Marco Antônio Couto (CPRM)

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 2020/1.

OURO PRETO

2020

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: Elis Figueiredo Oliveira

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

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482c Oliveira, Elis Figueiredo .
Caracterização geofísica do lineamento Córrego do Sítio, Quadrilátero
Ferrífero, MG. [manuscrito] / Elis Figueiredo Oliveira. - 2020.
97 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Sílvia Carvalho Barbosa.
Coorientador: Dr. Marco Antônio Couto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geofísica. 2. Deconvolução de Euler. 3. Quadrilátero Ferrífero (MG).
I. Barbosa, Maria Sílvia Carvalho. II. Couto, Marco Antônio. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.3

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Caracterização Geofísica do Lineamento Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero, MG

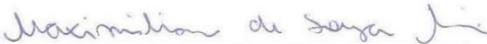
AUTORA: ELIS FIGUEIREDO OLIVEIRA

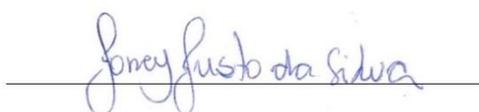
ORIENTADOR: Maria Sílvia Carvalho Barbosa

Aprovada em: 17 de julho de 2020

BANCA EXAMINADORA:

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

Prof. Dr. Maximiliano Martins  DEGEO/UFOP

Dr. Joney Justo da Silva  Observatório Nacional/RJ

Ouro Preto, 17/07/2020

Agradecimentos

Este trabalho finda o encerramento desta fase de reunião e partilha de conhecimento geológico e de vida, e deixa o coração aberto aos desafios de profissional da geologia e a responsabilidade de aplicar e compartilhar de forma consciente o conhecimento adquirido até aqui.

Agradeço, em primeiro lugar, a meus pais, Ademir e Maria Beatriz, e a minha irmã Nanna, que sempre acreditaram em mim, incentivaram a seguir em frente e nunca desistir de sonhar. Obrigada pelos ensinamentos de vida que me permitiram chegar até aqui e querer ir além.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pela acolhida, qualidade de ensino e possibilidade de viver esses anos extraordinários.

Sou grata a todos os professores que tive a oportunidade de conhecer e adquirir um pouco do saber das ciências. Em especial à professora Maria Sílvia, pela oportunidade de sua orientação e todo incentivo, dedicação e paciência. Agradeço também ao co-orientador Marco Antonio que possibilitou discussões construtivas acerca da geofísica. Deixo minha admiração a todos vocês.

Agradeço à Sociedade de Geofísica Aplicada, a **SGA**, pela chance de participar desse grupo que acende a luz da geofísica nos corredores do DEGEO e da comunidade geológica. Tenho muito orgulho e gratidão!

E obrigada aos amigos, principalmente àqueles da geologia, vocês me trouxeram leveza à vida, boas companhias nos melhores momentos que pude compartilhar e apoio nos momentos mais difíceis. Os levarei para sempre.

SUMÁRIO

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Resumo	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Localização.....	2
1.4 Metodologia.....	3
2 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	7
2.1 Contexto geológico regional.....	7
2.2 Evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero	10
2.3 Contextualização geológica do lineamento Córrego do Sítio	13
2.3.1 O Supergupo Rio das Velhas	13
2.3.2 Trabalhos anteriores	15
2.3.3 O Lineamento Córrego do Sítio	17
2.3.4 Unidades litoestratigráficas.....	18
2.3.5 Evolução estrutural.....	23
3 MÉTODOS GEOFÍSICOS	25
3.1 Introdução	25
3.2 Gravimetria.....	25
3.2.1 Introdução	25
3.2.2 O Campo Gravitacional.....	26
3.2.3 Densidade das rochas	26
3.2.4 Levantamento gravimétrico	27
3.2.5 Tratamento dos dados	28
3.2.6 Anomalias gravimétricas.....	31
3.3 Magnetometria.....	33
3.3.1 Introdução	33
3.3.2 O campo magnético terrestre	33
3.3.3 Susceptibilidade magnética dos materiais.....	34

3.3.4	Levantamento magnetométrico	35
3.3.5	Anomalias magnéticas	36
3.3.6	Tratamento dos dados	36
3.4	Deconvolução de Euler	38
3.5	Radiometria	39
3.5.1	Radioatividade	40
3.5.2	Levantamento radiométrico	41
3.5.3	Dados radiométricos	41
4	ANÁLISE QUALITATIVA	43
4.1	Introdução	43
4.2	Banco de dados geofísicos	43
4.3	Análise gravimétrica	47
4.4	Análise magnetométrica	52
4.5	Análise radiométrica	56
4.6	Análise morfoestrutural	59
5	ANÁLISE QUANTITATIVA	61
5.1	Introdução	61
5.2	Apresentação dos resultados	61
6	INTEGRAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA	69
6.1	Introdução	69
6.2	Discussão dos resultados	70
7	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo. A) Mapa do estado de Minas Gerais com destaque para a área do Quadrilátero Ferrífero;	3
Figura 2.1 - A) Localização do QFe no contexto regional do Quadrilátero Ferrífero a sul do Cráton São Francisco.....	8
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	9
Figura 2.3 - Mapas de subdivisão dos blocos que subdividem o Supergrupo	14
Figura 2.4 – Perfil esquemático NW-SE, representando a inversão estratigráfica devido ao empurrão do Complexo Santa Barbara sobre o Grupo Quebra Ossos e demais.....	18
Figura 2.5 - Mapa geológico simplificado do QFe com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas	20
Figura 2.6 - Mapa geológico da área de estudo.	21
Figura 3.1 - (A) A correção de ar livre para uma observação numa altura h acima do datum; (B) A correção Bouguer.	29
Figura 3.2 - Representação das linhas de força do campo magnético terrestre.....	33
Figura 3.3 - Representação esquemática de distinção entre os magnéticos, geográficos e geomagnético.....	34
Figura 3.4 - Gráfico de valores médios e intervalo de susceptibilidade das rochas	35
Figura 3.5 - Abundância dos elementos radioativos nos diferentes tipos e composição de rochas.....	40
Figura 4.1 - Mapa da distribuição de estações gravimétricas ao longo do território brasileiro.....	44
Figura 4.2 - Mapa de localização das estações gravimétricas para área expandida do limite da área de estudo	45
Figura 4.3 - Divisão de blocos do levantamento aerogeofísico. A área destacada em vermelho corresponde ao bloco onde se localiza a área deste estudo	46

Figura 4.4 - Mapas geofísicos gerados a partir dos dados de gravimetria com o limite da área de estudo inserida na área total dos mapas.....	49
Figura 4.5 – Mapa de divisão em domínios gravimétricos de acordo com os intervalos de variação da densidade a partir do mapa de primeira derivada vertical	50
Figura 4.6 - A) Mapa de lineamentos gravimétricos a partir do mapa de segunda derivada da Anomalia Bouguer.....	51
Figura 4.7 - Mapas magnetométricos. A) Mapa de Campo anômalo (CA); B) Mapas de Amplitude de sinal Analítico (ASA) e de Inclinação do sinal analítico (TILT);.....	52
Figura 4.8 - A) Mapa de magnetofácies a partir do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA); B) Mapa de amplitude de sinal analítico; C) Mapa geológico da área de estudo.	54
Figura 4.9 - A) Mapa de lineamentos geofísicos, a partir do mapa ASA (B), a esquerda e de lineamentos de relevo a direita, a partir da imagem SRTM	55
Figura 4.10 - Mapas radiométricos. A) Canais de potássio (K), tório (Th) e urânio (U); B) Mapas de Razões Th/K, U/K, U/Th. C) Mapas de Fator F.....	56
Figura 4.11 - Imagem ternária da área e sua subdivisão em regiões que delimitam as radiofácies.	57
Figura 4.12 – A) Mapa de lineamentos radiométricos a partir do mapa de concentração de potássio. B) Mapa radiométrico de concentração de potássio.	58
Figura 4.13 –A) Mapa de lineamentos morfoestruturais sobre de relevo sombreado. B) Mapa de relevo sombreado. C) Roseta com direções principais dos lineamentos traçados. ...	59
Figura 5.1 - Mapa de amplitude do sinal analítico com a localização dos perfis traçados para a deconvolução de Euler.	61
Figura 5.2 - Resultado da Deconvolução de Euler para cada perfil, visualizado sob o mapa ASA.	63
Figura 5.3 - Perfis de deconvolução e visualização 2D dos perfis 17 e 21.....	64
Figura 5.4 – Perfi 17 de Deconvolução de Euler.	65
Figura 5.5 - Perfil 21 de deconvolução de Euler.....	66

Figura 5.6 – Resultado da Deconvolução de Euler plotados no mapa ASA (legenda da escala de cores na figura 5.1) e o resultado da interpolação dos dados pela krigagem.	67
Figura 5.7 - Resultado da Krigagem em visualização 3D de diferentes ângulos de projeção.	68
Figura 6.1 - Integração dos mapas geológico e geofísicos.	69
Figura 6.2 – Indicação da localização de anomalias geofísicas sobre o mapa geológico, identificadas a partir da compilação de dados dos mapas geofísicos.	70
Figura 6.3 - A) Mapa de divisão em domínios gravimétricos de acordo com os intervalos de variação da densidade.	71
Figura 6.4 – A) Sobreposição do mapa geológico sobre o mapa magnetométricos ASA. B) Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA). C) Mapa geológico.	73
Figura 6.5 – Mapa de magnetofácies do mapa ASA. A) Categorização em magnetofácies do mapa ASA. B) Mapa geofísico ASA. C) Mapa geológico.	75
Figura 6.6 - Mapa TILT com delimitação de anomalias pontos importantes de fontes de anomalias.	76
Figura 6.7 - Mapas de derivadas. A) Derivada horizontal no eixo x. B) Derivada horizontal no eixo y. C) Derivada vertical no eixo z. D) Segunda Derivada vertical no eixo z.	77
Figura 6.8 - A) Mapa radiométrico ternário categorizados pelas radiofácies. B) Mapa geológico.	78
Figura 6.9 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométrico de concentração pelo fator F. B) Mapa radiométrico de concentração pelo fator F.	80
Figura 6.10 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométricos de concentração pela razão de tório por potássio (Th/K)..	81
Figura 6.11 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométricos de concentração de potássio. B) Mapa radiométrico de concentração de potássio.	82
Figura 6.12 - Sobreposição de todos os mapas radiométricos com evidência de anomalia coincidente em cada um dos mapas.	83

Figura 6.13 - Deconvolução de Euler dos perfis 17 e 21 plotados sobre o mapa geológico (legenda do mapa na figura 2.6).....	84
Figura 6.14 - Interpretação das anomalias magnéticas do perfil 17 pelo método da Deconvolução de Euler	86
Figura 6.15 - Interpretação das anomalias magnéticas do perfil 21, segundo pelo método da Deconvolução de Euler.	87
Figura 6.16 -Visualização inferior da imagem 3D do resultado da krigagem dos dados de deconvolução com a indicação de localização do lineamento Córrego do Sítio.	88
Figura 6.17 – Resultado da Krigagem em visualização 3D de diferentes ângulos de projeção (legenda de escala de cores na figura 6.16).....	89
Figura 6.18 - Integração dos mapas geológico e magnetométrico com o resultado da krigagem ressaltando a anomalia circulada em amarelo.....	90
Figura 6.19 – Anomalias caracterizadas sobre a imagem 3D de krigagem (legenda da escala de cores na figura 6.16).	91

INDÍCE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Intervalos de densidade aproximados (mg/m^3) de alguns tipos de rochas e minerais de minério mais comuns	27
Tabela 3.2 - Filtros de Fourier e finalidades geofísica.	37
Tabela 3.3 - Tabela de índice estrutural aplicado à equação de Euler (Modificado de 39	
Tabela 4.1 - Classificação em magnetofácies do mapa de amplitude de sinal analítico (ASA).....	53
Tabela 4.2 - Classificação das radiofácies delimitadas a partir do mapa radiométrico Ternário.	57
Tabela 5.1 - Tabela com dados de comprimento do perfil e as respostas de profundidade mínima e máxima de cada um dos perfis pela deconvolução de Euler.	62

Resumo

Apesar da compreensão evolutiva da Quadrilátero Ferrífero estar sempre avançada e atualizada, informações acerca de estruturas regionais em subsuperfície ainda é necessário para a complementação do conhecimento do arcabouço estrutural e evolução tectônica e metalogenética da região. Nesse contexto, a geofísica tem grande importância no reconhecimento da subsuperfície a partir do contraste das propriedades físicas do meio e sua relação com as informações geológicas disponíveis. Neste trabalho, propõe-se executar uma caracterização geofísica das rochas que compõem o greenstone belt Rio das Velhas, na porção nordeste do QFe, com ênfase no lineamento regional Córrego do Sítio. Para tanto, foram interpretados dados geofísicos de gravimetria terrestre obtidos pelo Banco Nacional de Dados Geofísicos (BNDG) e dados de magnetometria e radiometria aerolevantados do Projeto Rio das Velhas, e a aplicação de técnica de inversão pela Deconvolução de Euler. A metodologia aplicada neste trabalho consistiu em três etapas, na análise geofísica qualitativa, com o processamento dos dados aerolevantados, na análise geofísica quantitativa que trata da inversão com a deconvolução de Euler, e a integração dessas análises com os dados geológicos disponíveis. A integração se deu com a comparação entre das áreas anômalas delimitadas nos mapas geofísicos e as informações de geologia e relação entre os lineamentos. Assim, pela gravimetria pode-se interpretar como uma região que exibe uma distribuição de densidade em função de uma compensação isostática local e a magnetometria e a radiometria permitiram a determinação de fontes de anomalia e a litologia associada a áreas com evidências de hidrotermalismo, o que orienta uma investigação de maior detalhe para esta área. A correlação dos lineamentos forneceu informações de que os contatos geológicos estão associados a fatores tectônicos e boa parte das estruturas, principalmente NW, têm remanesência de eventos geológicos pretéritos. Além disso, a deconvolução de Euler indicou que as anomalias em geral são mais superficiais e a estrutura principal de análise, o lineamento Córrego do Sítio, também não possui grandes profundidades. Foi detectado pela interpolação do resultado da inversão que onde ocorrem as maiores profundidades são em alguns contatos litológicos e em uma porção de enxame de diques máficos. Portanto, este estudo sugere uma região de grande complexidade estrutural, e cabe à complementação com a deconvolução em dados gravimétricos e um potencial de investigação detalhada das áreas com detecção de anomalias e hidrotermalismo que se estenda a uma área além do lineamento Córrego do Sítio.

Palavras-chave: Geofísica, Deconvolução de Euler, Quadrilátero Ferrífero, Lineamento Córrego do Sítio

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) se localiza no extremo sul do Cráton São Francisco e é designado uma importante província metalogenética (Almeida 1976) e geograficamente, essa região está localizada na porção centro-sul do estado de Minas Gerais. Dada a sua complexidade geológica e a necessidade de compreender melhor os processos de formação e deformação das rochas, a relação espacial das principais feições estruturais e o comportamento reológico da crosta terrestre, a geofísica passa a ter relevante papel ao adquirir informações de subsuperfície para compor, com os estudos geológicos estruturais, uma interpretação precisa dos modelos geotectônicos.

A área de estudo se trata da região onde ocorre uma estrutura denominada lineamento Córrego do Sítio, inserido no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero (QFe), onde se localiza o *Greenstone belt* Rio das Velhas (GBRV), correspondendo à sua porção nordeste. Apesar dos avanços significativos alcançados sobre o conhecimento do arcabouço estrutural, evolução geotectônica e suas relações com os depósitos minerais (em particular, auríferos e ferríferos), ainda há limitações no entendimento sobre a continuidade em profundidade de estruturas regionais e disposição espacial em subsuperfície de litologias relevantes para a evolução geotectônica e metalogenética do *Greenstone belt* Rio das Velhas.

Por meio de análise geofísica, é possível estudar a distribuição espacial em profundidade das propriedades físicas de interesse. Dessa forma, esse trabalho propõe um estudo de análise geofísica do lineamento Córrego do Sítio, quanto à análise de sua continuidade em subsuperfície e caracterização dos principais padrões de lineamentos associados ao controle estrutural da área. Para tanto, serão interpretados dados geofísicos de gravimetria terrestre, magnetometria e radiometria de alta resolução, e aplicação da técnica de Deconvolução de Euler.

1.1 Objetivos

Neste trabalho, propõe-se executar uma interpretação geofísica do arcabouço estrutural das rochas da porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero inseridas no contexto do *Greenstone belt* Rio das Velhas, com ênfase no lineamento regional conhecido como Córrego do Sítio.

O objetivo é analisar a continuidade das estruturas e as porções que possuem potencial para uma investigação geológica mais detalhada com o emprego da geofísica como ferramenta de estudo, a partir dos métodos de gravimetria, magnetometria e radiometria com a confecção de mapas temáticos de cada um desses métodos. Essa interpretação será realizada pela análise qualitativa e quantitativa geofísico-geológica e a visualização em subsuperfície da estrutura alvo da pesquisa, por meio do método de Deconvolução de Euler para os métodos potenciais.

1.2 Justificativa

Embora o conhecimento do arcabouço estrutural e evolução tectônica e metalogenética do Quadrilátero Ferrífero esteja bastante evoluído, o entendimento das estruturas regionais quanto à sua continuidade e disposição espacial em subsuperfície ainda é reduzido, uma vez que esses fatos são importantes para a complementação da compreensão evolutiva da região, principalmente do *Greenstone belt* Rio das Velhas.

A porção de estudo proposta nesse trabalho se trata de uma área de grande importância econômica e por isso há diversos trabalhos acadêmicos e um forte interesse de investigação da região. Esta se apresenta com um alto grau de intemperismo das rochas presentes (Muniz 2017), assim as estruturas muitas vezes não são fáceis de serem identificadas, sendo, portanto, uma das justificativas que a geofísica se faz essencial na área.

Para a caracterização geofísica este trabalho propõe o estudo da gravimetria a partir de um banco de dados terrestres, se tratando de um complemento deste trabalho para a porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Assim, a caracterização geofísica do lineamento Córrego do Sítio presente no *Greenstone belt* tem o intuito de engrandecer o conhecimento da subsuperfície e, desta forma, contribuir para a compreensão da geologia local.

1.3 Localização

A estrutura alvo deste estudo é o lineamento Córrego do Sítio e ele ocorre na porção nordeste do QFe, próximo aos municípios de Barão de Cocais e Santa Bárbara e o acesso principal se dá pela MG-262 (Figura 1.1). Esta área está inserida no contexto geológico do *Greenstone belt* Rio das Velhas, onde há importantes ocorrências minerais aurífera e ferrífera onde encontra-se uma das maiores mineradoras de ouro do mundo A

região se encontra entre duas importantes estruturas, a Serra do Caraçaa sudeste e Serra do Gandarela a noroeste.

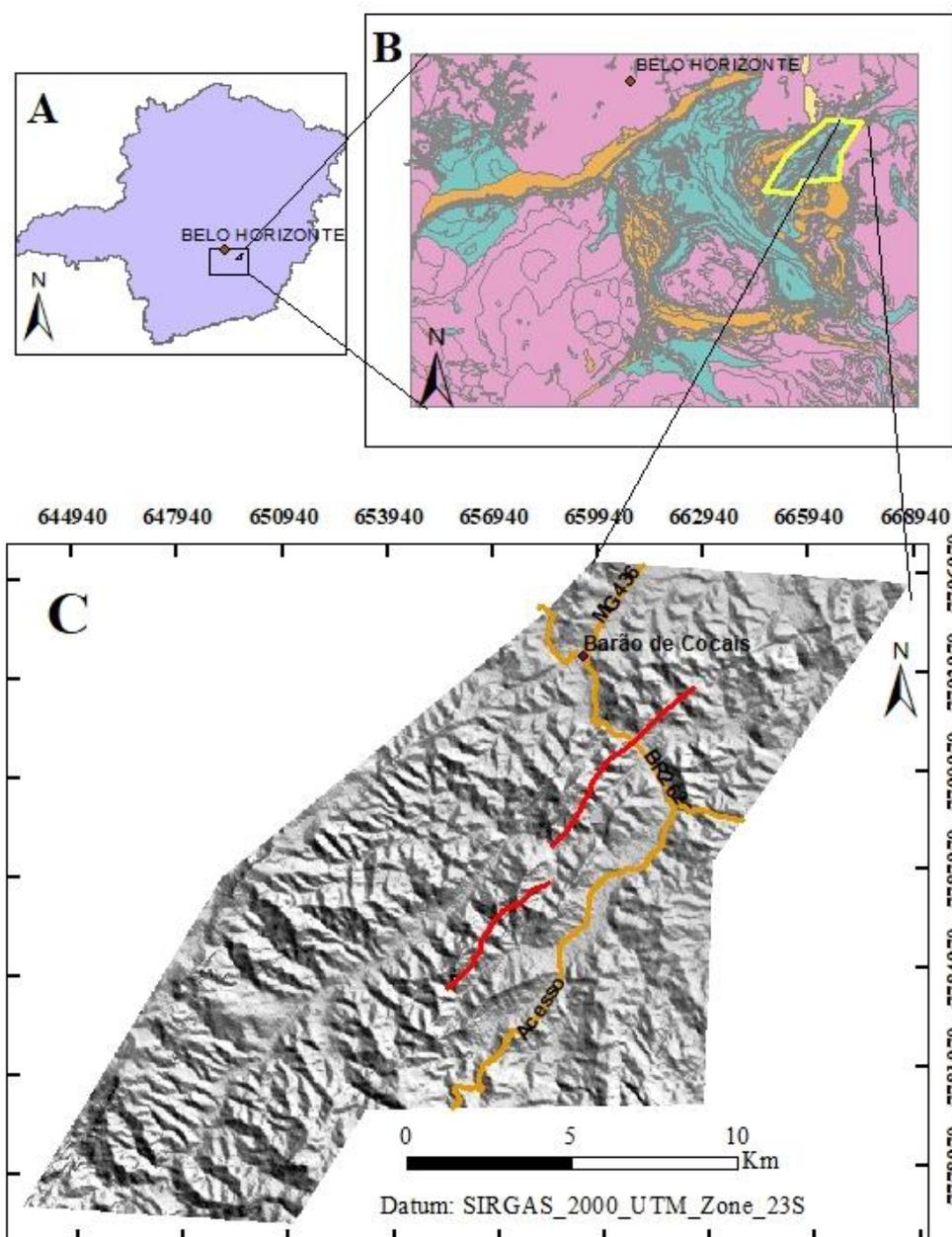


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo. A) Mapa do estado de Minas Gerais com destaque para a área do Quadrilátero Ferrífero; b) Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero evidenciando os principais contextos geológicos bem como o destaque em amarelo para a área de estudo deste trabalho; c) Imagem SRTM de relevo sombreado com indicação das principais vias de acesso e cidades dentro da área.

1.4 Metodologia

Este trabalho foi dividido em seis etapas: revisão bibliográfica, levantamento dos bancos de dados geológico e geofísico, análise geofísica qualitativa e quantitativa e integração geológico-geofísica.

Essa sequência de metodologia tem sido empregada em diversos Trabalhos de Conclusão de Curso do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto que envolve a temática geofísica.

A primeira fase é a pesquisa bibliográfica que envolve o levantamento de artigos, trabalhos de conclusão de curso, mestrados, doutorados e relatórios técnicos sobre o Quadrilátero Ferrífero e o Greenstone belt Rio das Velhas para levantamento de dados geológicos regionais, sobre as estruturas alvo do presente estudo e sobre a metodologia geofísica que será empregada.

O banco de dados geológicos utilizados neste trabalho foi extraído da base de dados do Serviço Geológico do Brasil –CPRM, adquirido pelo banco de dados online GeoSBG. Essa base de dados se constitui de cartas geológicas de escala 1:25.000, produto do Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG (2014), resultado da integração do projeto de mapeamento geológico pelo convênio *United States Geological Survey* – USGS/DNPM, que cartografou principalmente, o Supergrupo Minas, e a integração ao mapeamento geológico do convênio DNPM/CPRM que cartografou o Supergrupo Rio das Velhas no interior do QFe. As folhas utilizadas para a área do trabalho foram Caeté, Catas Altas, Gandarela e Santa Bárbara integradas, e desta última extraída a área de interesse deste estudo. Delimitada a área, foi gerado o mapa geológico da área de estudo por meio do *software ArcMap 10.3*. O mapa de relevo sombreado foi produzido a partir de imagem SRTM, a fim de destacar as principais estruturas de relevo, usado para traçar seus lineamentos estruturais superficiais, utilizando o sombreado segundo uma direção de 45° e azimute de 215 em escala de cinza.

A base de dados geofísicos decorre da utilização de dados de gravimetria, proveniente do Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG/ANP), e de dados de magnetometria e radiometria procedente do Projeto Rio das Velhas, campanha de aerolevanteamento geofísico realizado pela parceria Codemig/CPRM de aquisição de informações geofísicas. Os detalhes sobre estes bancos de dados serão descritos no Capítulo 4.

A partir das informações dos bancos de dados, foram produzidos mapas temáticos de cada um dos métodos utilizados neste estudo, gravimetria, magnetometria e radiometria, a fim de expressar as anomalias geofísicas da área. O banco de dados trabalhado já se apresentou com as devidas correções e foi realizado apenas a extração de coordenadas para a área de interesse. Para a confecção desses mapas, o processamento dos dados foi feito no *software Geosoft Oasis Montaj 9.3*, com a manipulação dos dados em arquivo gdb. A primeira etapa é a interpolação desses dados com a geração de *grids*, e com a utilização da extensão *magmap*, aplica-se os filtros nesses *grids* e, por fim, a geração do mapa.

Dessa forma, foram gerados os principais mapas para as devidas análises: (a) gravimétricos, de anomalia Bouguer e anomalia Ar Livre (*Free-air*) e seus respectivos mapas de derivadas, vertical e horizontal, e segunda derivada vertical; (b) magnetométricos, sendo os de campo anômalo (CA),

Amplitude do Sinal Analítico (ASA), mapa de cada derivada do campo anômalo para X, Y e Z, da segunda derivada vertical e de inclinação do sinal analítico, (TILT); (c) radiométricos, que são nove, os de canal de Urânio, Tório e Potássio, os mapas de razões (Th/U; K/Th; K/U), o mapa ternário, de contagem total e de Fator F.

A análise qualitativa foi realizada para os três métodos, dessa forma, foram utilizados os mapas de segunda derivada da anomalia Bouguer para análise gravimétrica, o mapa ASA para a análise magnetométrica e o mapa ternário e de concentração de potássio para a análise radiométrica. Para essa avaliação, foram setorizados os domínios das anomalias, com a delimitação das anomalias gravimétricas e caracterização em magnetofácies e radiofácies, a fim de isolar o *range* de anomalias positivas e negativas. Além disso, nessa etapa foram assinalados os lineamentos geofísicos e lineamentos morfométricos. Para esses tratamentos, foi utilizado o software *ArcMap* 10.3, que possibilitou a determinação das fácies geofísicas e o traçado dos lineamentos, com a geração de roseta de direções preferenciais dos lineamentos a partir do *software OpenStereo*.

A análise quantitativa foi realizada pelo método de Deconvolução de Euler (2D), utilizando o *software* livre *Euldepth*. A partir do mapa de ASA, foram traçados 33 perfis magnéticos pelo Oasis Montaj, equiespaçados de 1km, de direção NW-SE. Esses dados são importados para o tratamento deconvolução, gerando para cada perfil resposta de anomalias magnéticas. Para uma visualização em 3D da estrutura em profundidade, os perfis foram interpolados por krigagem.

Em seguida, a integração dos dados geológico-geofísicos foi elaborada também em ambiente SIG (*ArcGis* 10.3), para a associação das anomalias geofísicas e a geologia da área. Essa integração foi realizada com a sobreposição dos mapas geológico e geofísicos para interpretação dos lineamentos, fácies predeterminadas e anomalias identificadas na deconvolução de Euler, e por fim, correlação entre as estruturas de superfície e subsuperfície.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO

Neste capítulo, será tratado sobre o contexto geológico em que a área de estudo está inserida no Quadrilátero Ferrífero. O alvo deste estudo será o lineamento Córrego do Sítio, onde afloram as rochas do *Greenstone belt* Rio das Velhas. Essas rochas serão detalhadas neste capítulo, segundo a litoestratigrafia e a sua evolução estrutural, a partir de estudos de mapeamento realizados na região pelo Projeto Rio das Velhas (Baltazar & Silva 1996).

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) se encontra na porção meridional do cráton São Francisco (Figura 2.1-a), importante unidade geotectônica que encerra uma grande parte do território brasileiro, abrangendo os estados da Bahia, Sergipe, Pernambuco, Goiás e Minas Gerais, limitado por cinturões orogênicos neoproterozoicos (Almeida 1977, Alkmim & Marshak 1998). O QFe tem esse nome atribuído pela abundante ocorrência de rochas (BIF's) e pelos depósitos ferríferos, também devido ao seu formato poligonal (Dorr 1969). A sua importância se dá pela ocorrência de terrenos *greenstones* arqueanos e formações ferríferas bandadas datadas do Proterozoico (Almeida 1977).

As grandes unidades litoestratigráficas que compõem o QFe são o embasamento, composto por Complexos Metamórficos granito-gnáissicos e integrando as supracrustais, tem-se uma sequência arqueana meta-vulcanossedimentar do Supergrupo Rio das Velhas (*Greenstone belt Rio das Velhas*) e a sequência metassedimentar paleoproterozoica do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi, descritas por Dorr (1969), tais rochas que sustentam as serras que delineiam a estrutura do QFe (Figura 2.1-b).

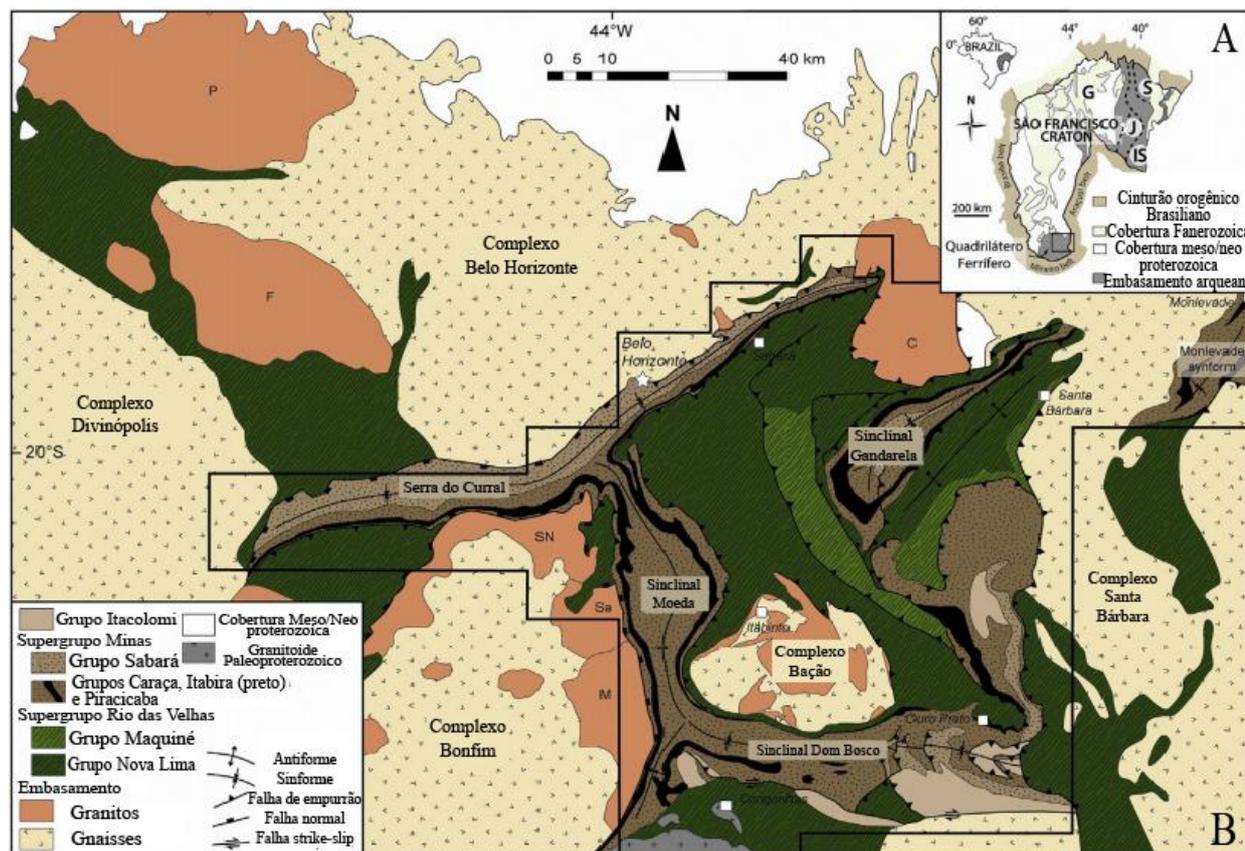


Figura 2.1- A) Localização do QFe no contexto regional do Quadrilátero Ferrífero a sul do Crátom São Francisco (Alkmim & Marshak 1998). B) Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero modificado de Alkmim & Marshak (1998) (Farina *et al.* 2016).

Os complexos metamórficos principais são o Belo Horizonte, o Caeté, o Santa Bárbara e o Bação, que têm aspecto polideformado, com bordas cisalhadas e formato dômico. Apresentam gnaisses do tipo TTG, datados do Arqueano entre 3,20-2,77Ga e intrusões graníticas potássicas, com idades inferiores a 2,77Ga (Lana 2013).

O Supergrupo Rio das Velhas é composto por uma sequência metavulcanossedimentar arqueana *Greenstone belt*, dividido em dois grandes grupos, Nova Lima e Maquiné, composto por rochas vulcânicas, basaltos e komatiitos, por BIF's do tipo Algoma, xistos e demais rochas metassedimentares do grupo Nova Lima, em um contato discordante, quartzitos, conglomerados e filitos compõem o grupo Maquiné, em seu topo (Dorr 1969). Baltazar & Zuchetti (2007) propõem uma subdivisão dessas rochas como uma associação de litofácies sedimentares, em uma unidade vulcânica toleítica-komatiítica basal, seguido por rochas sedimentares químicas associadas, uma unidade intermediária vulcanoclástica com vulcanismo félsico associado e uma unidade clástica superior.

Descrito primeiramente por Dorr (1969), em contato discordante com o topo do Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas é formado por rochas paleoproterozoicas em uma sequência

metassedimentar, constituída por sedimentos plataformais clásticos e químicos. Essa sequência é subdividida em quatro grupos e formações, contíguas (Figura 2.2).

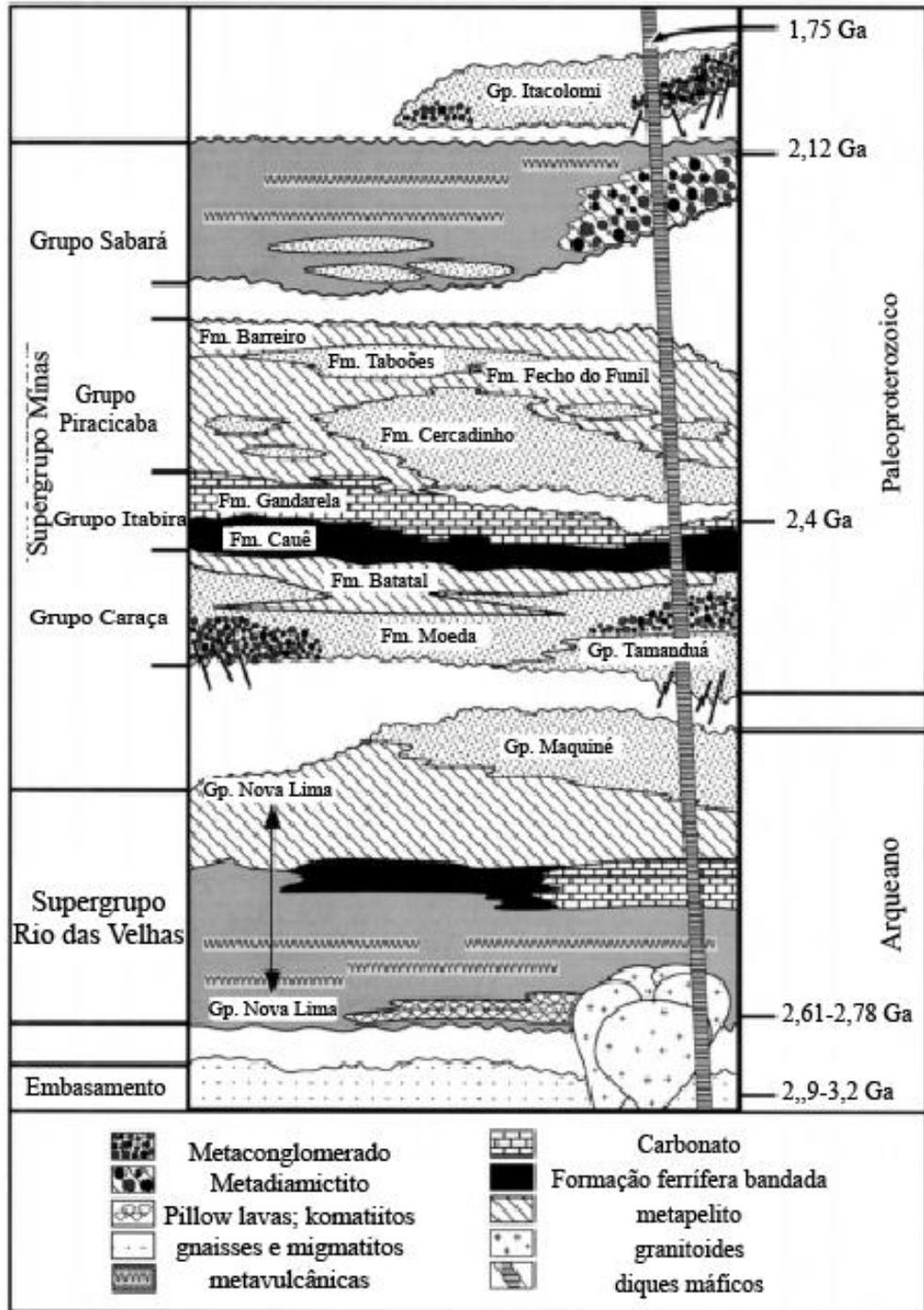


Figura 2.2- Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak 1998).

Da base para topo, ocorre o Grupo Caraça, o qual apresenta rochas de deposição siliciclástica, com metarenitos com porções conglomeráticas que compõem a Formação Moeda distribuídas lateralmente, e subjacente à Formação Batatal, com filitos grafitosos de coloração prateada, característica dessa última Formação. Já as rochas sobrepostas compõem o Grupo Itabira, cuja origem é de deposição química, particulares desse grupo, é composto pela Formação Cauê, com formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior, com ocorrência também de calcários, calcítico e dolomítico. A esse grupo também pertence a Formação Gandarela, com calcários, dolomitos, filitos dolomíticos e algumas ocorrências de formação ferrífera. O Grupo Piracicaba, em seguida, registra a retomada da sedimentação siliciclástica, sendo na sequência a Formação Cercadinho, com quartzitos, filitos quartzosos e dolomitos, a Formação Fecho do Funil, sendo composto, principalmente, por filitos e filitos dolomíticos, a Formação Taboões, com quartzitos em sua composição, sem continuidade lateral e, portanto, de ocorrência restrita, e por último, no topo, a Formação Barreiro, composta por filitos e filitos carbonosos. E no topo da sequência ocorre o Grupo Sabará, que predomina xistos de origem metavulcânica com aparições laterais de metarenitos e metadiamicititos.

O Grupo Itacolomi encontra-se no topo da sequência, composto basicamente por arenitos e metaconglomerados com clastos de BIF, com ocorrência restrita à porção SE, aflorantes na Serra de Ouro Preto e Serra de Ouro Branco (Alkmim & Marshak 1998).

2.2 EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O cráton São Francisco estabilizou-se no início do Proterozoico, entretanto, os dois últimos ciclos tectônicos – o Transamazônico e o Brasileiro – afetaram as bordas do cráton, tal que uma das regiões foi a do Quadrilátero Ferrífero, marcado por intensos dobramentos e complexidade estrutural (Chemale *et al.* 1991). A sua evolução apresenta diversas hipóteses, no entanto, neste tópico serão descritos dois dos mais atuais modelos, sendo os de Endo (1997) e de Alkmim & Marshak (1998).

Endo (1997) retrata a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero como um modelo transpressivo e transtrativo, com a superposição de três principais ciclos orogênicos, sendo eles o Jequié (2,78 a 2,55Ga), o Transamazônico (2,25 a 1,90Ga) e o Brasileiro (0,6 a 0,5Ga). O evento Jequié é descrito como um regime tectono-magmático transpressivo sob condições metamórficas de fácies xisto-verde a anfíbolito médio com três fases deformacionais, Rio das Velhas (RV) I, RV II e RV III, de plano fluxo N-S. Este evento é responsável, no seu início, pelo magmatismo e metamorfismo do Grupo Nova Lima e, posteriormente, pela consolidação do Grupo Maquiné, foliação cisalhante milonítica N-S, faturamento NE-SW, intrusões de diques máficos e magmatismo básico e deformação com inversão da Bacia Maquiné. O ciclo Transamazônico, Paleoproterozoico, é formado em duas fases

sob metamorfismo de fácies xisto-verde a anfibolito, com plano de fluxo N-S subvertical e caráter transpressional.

A primeira fase se inicia com um caráter transpressivo dextral, de transporte tectônico SW e tem como consequência a inversão da bacia Minas, colocação de plutons graníticos e intensa atividade magmática, seguida de uma atividade extensional dextral, que resultou na formação de megassinclinais, estruturas dômicas e zonas de cisalhamento, como as falhas Engenho, Água Quente e Bom Sucesso. A segunda fase do ciclo Transamazônico foi desenvolvida sob regime transpressivo sinistral, com deslocamentos dirigidos para N-NW, ocorre a inversão da bacia Itacolomi e colapso orogenético com deslocamentos normais de NW para SE, associado à reativação de falhas e fraturas e intrusões de diques máficos e corpos graníticos. O ciclo Brasileiro, por fim, se desenvolve também em dois eventos de regimes transpressionais, com plano de fluxo NE-SW e metamorfismo mais baixo (fácies xisto-verde), evidenciado na porção leste. A primeira fase possui uma cinemática dextral, com a reativação de discontinuidades com falhamentos reversos e dobramentos com vergência NW, além de uma série de cavalgamentos passando para uma tectônica de embasamento envolvido, com o transporte tectônico preferencial para W para todas essas estruturas. Na segunda fase, a cinemática é sinistral, com transporte tectônico para N-NW, com geração de algumas estruturas extensionais, reativação de discontinuidades, dobras suaves e geração de uma clivagem espaçadas EW.

Alkmim & Marshak (1998) descrevem a evolução da estruturação do Quadrilátero Ferrífero, inicialmente, com fragmentos crustais arqueanos, de até 3,2Ga, que serviram de embasamento para o *Greenstone belt* Rio das Velhas (2,8 - 2,7Ga). O arranjo desses terrenos se deu em um evento tectônico de 2,7Ga a 2,6Ga, marcado por plutonismo intermediário nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas e os domos de embasamento circundados pelas rochas supracrustais (teoria dos domos e quilhas). Em seguida, a região registra o estabelecimento de uma plataforma continental de uma bacia de margem passiva paleoproterozoica, onde foram depositados os sedimentos do Supergrupo Minas. Posteriormente, há cerca de 2,1Ga, desenvolveu-se um cinturão de falhas e dobras, com vergência NW, responsável pelo desenvolvimento de zonas de cisalhamento de escalas regionais, quando se deu o colapso orogenético (2,095Ga). Esse evento trata-se da Orogênese Transamazônica, cuja ocorrência não gerou foliação expressiva. O segundo evento que afetou o QFe data do final do neoproterozoico, conhecido como Brasileiro, sendo de natureza compressional e caracterizado pelo desenvolvimento de um cinturão de dobras e falhas com vergência para W, que promoveu a deformação de estruturas pretéritas e a reativação de estruturas evidenciadas na porção leste do QFe (Alkmim & Marshak 1998).

Enfatizando a geologia local, Baltazar & Zuchetti (2007) interpretam a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero baseado na análise geométrica e cinemática de estruturas planares e lineares das rochas do Supergrupo Rio das Velhas. Esses autores propõem desenvolvimento da estrutura em três eventos deformacionais com descrição de quatro gerações de estruturas. O primeiro evento é descrito

como de idade arqueana e natureza compressional com a primeira (D1) e segunda (D2) geração de estruturas atribuída. A terceira geração (D3) de estruturas remete a um segundo evento, paleoproterozoico e de natureza extensional e o terceiro evento, neoproterozoico, abriga estruturas de quarta geração (D4) de características compressionais.

O primeiro evento D1 é exclusivo do *Greenstone belt* Rio das Velhas e do embasamento, com estruturas bem preservadas na porção sudeste do QFe. Essas estruturas D1 são geradas a partir de falhas de empurrão de regime dúctil, com transporte S-N, caracterizado como um evento de encurtamento crustal em que os blocos a norte foram erguidos em relação aos do Sul, gerando as estruturas mais antigas com direção E-W e ENE-WNW. As estruturas identificadas configuram-se em dobras isoclinais e recumbentes, com vergência para S ou S-SE e estruturas planares, como o acamamento NE associado a uma foliação S1, milonitizada em algumas porções, e lineações de interseção, de estiramento e mineral. Esse evento afeta apenas o Grupo Nova Lima e apresenta idades do arqueano (2,75-2,67Ga) (Lobato *et al.* 2007).

As estruturas D2, de segunda geração, são mais bem preservadas na porção central do QFe. A maioria das estruturas apresentam direção NW, associadas a falhas de empurrão e dobras isoclinais, com mergulho para SW. Apresenta uma foliação S2 e lineação mineral e de estiramento subparalelas, com direção para NE. Nesse evento que se forma importantes zonas de falha, como a de São Vicente, em regime dúctil, marcada por estruturas milonitizadas e lineação de estiramento. As falhas apresentam uma componente horizontal sinistral, superpostas pela reativação do último evento tectônico Neoproterozoico (estruturas D4). O Grupo Maquiné apresenta apenas estruturas de características da deformação D2 e suporta clastos que possuem estruturas referentes à deformação D1, o que sustenta a evidência dessas duas fases referentes ao primeiro evento, no período deposição do Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Zuchetti 2007). As zonas de cisalhamento geradas a partir desse evento estão intimamente ligadas à depósitos de ouro de alteração hidrotermal, como depósitos de Raposos, Morro Velho e São Vicente e ocorrem paralelos à foliação (NE-SW), em geral, ortogonais ao transporte tectônico referente à segunda fase.

As estruturas D3 são relacionadas a um evento extensional que comporta as grandes estruturas regionais, como os sinclinais (Moeda, Bomfim, Gandarela e Cural) e estruturas dômicas do embasamento granito-gnáissico. Essas estruturas são bem expostas na porção central do QFe, na região do complexo Bação. Baltazar & Zuchetti (2007) indicam o soerguimento dos complexos metamórficos, o que permitiu a geração de uma terceira família de foliação milonítica (S3) na borda dos corpos granito-gnáissicos e uma lineação mineral bastante marcada, com mergulho no sentido para fora do corpo (*down-dip*). Além disso, essa elevação produziu zonas de cisalhamento normais ao redor dos complexos e uma consequente reorientação das estruturas em contato já existentes do *greenstone*, constatado por foliação S/C e *shear bands*.

O terceiro e último evento que afeta as rochas do GBRV são as estruturas D4 e são as que se apresenta mais notável no QFe, principalmente na porção oriental. Apresentam direção preferencial N-S, tal evento atribuído ao ciclo Brasileiro. Também apresentam zonas de cisalhamento bem desenvolvidas, com estruturas milonitizadas, uma lineação de estiramento E-SE e foliação S/C, indicando uma vergência do movimento para oeste. Esse evento é de caráter compressional, com rampas de empurrão oblíquas frontais e deformação tangencial, caracterizando um regime de cisalhamento simples (dúctil e rotacional), caracterizado como *fold-thrust*. Essas características são confirmadas pela presença de uma foliação S4, com direção NW, NS e NE e mergulho para leste, evidenciando que o transporte se deu no sentido E-W. Essas estruturas são ilustradas pelo estiramento dos seixos do conglomerado da Formação Casa Forte, sombra de pressão nos grãos em metapelitos do Grupo Nova Lima e minerais planares que preservam a foliação milonítica, além de lineações com direção entre E-W e WNW-ESSE. É comum, portanto, a manifestação de clivagem de crenulação de direção N-S e E-W, subverticais, e falhas rúpteis segmentando os *fronts* de empurrão, e formam-se dobras isoclinais apertadas com eixo com vergência para W e paralelo às direções das falhas, melhor visualizadas nas rochas da Formação Casa Forte. Entre as megaestruturas relacionadas, destaca-se o Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas, com um traçado em arco com concavidade para leste, configurando um empurrão e dobramento que envolvem a Sinclinal Gandarela, e a Falha de São Vicente com indício de reativação.

2.3 CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA DO LINEAMENTO CÓRREGO DO SÍTIO

Na área de estudo predomina o conjunto de rochas pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas, dessa forma, esta seção dedica-se ao detalhamento das rochas e evolução das estruturas presentes nesse contexto, enfatizando a descrição do lineamento Córrego do Sítio, alvo principal deste trabalho.

Na área de estudo predomina o conjunto de rochas pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas, dessa forma, esta seção dedica-se ao detalhamento das rochas e evolução das estruturas presentes nesse contexto, enfatizando a descrição do lineamento Córrego do Sítio, alvo principal deste trabalho.

2.3.1 O Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas tem sua primeira divisão feita por Dorr (1957), que o definiu como “Série Rio das Velhas”, dividida em grupos Nova Lima e Maquiné, com rochas de origem vulcanossedimentar e de sedimentação clástica, com características de metamorfismo de baixo grau. Posteriormente, outras divisões foram realizadas por O’Rourke (1957), Gair (1962), Schorscher (1978)

e Almeida (1976), com subdivisões em grupos e formações. A caracterização dessas unidades como um greenstone se deve a Schorscher (1978), que definiu o Grupo Quebra Ossos como unidade basal da sequência, rochas do tipo metavulcânicas/intrusivas básica/ultrabásica que ocorrem a extremo leste do Quadrilátero ferrífero.

A partir do mapeamento realizado no Projeto Rio das Velhas, Zucchetti & Baltazar (1996) propuseram uma nova compartimentação litoestratigráfica do Supergrupo Rio das Velhas, conforme uma associação de litofácies, a fim de maior detalhamento da evolução do greenstone. Os estudos realizados permitiram a integração de dados estruturais, petrográficos, petrológicos e de caracterização de campo, e admitiu-se a distribuição das rochas segundo quatro grandes domínios litoestruturais, cujos limites entre eles coincidem com grandes lineamentos estruturais cartografados. Assim, foram nomeados de blocos tectônicos Caeté, Nova Lima, Santa Bárbara e São Bartolomeu (Figura 2.3).

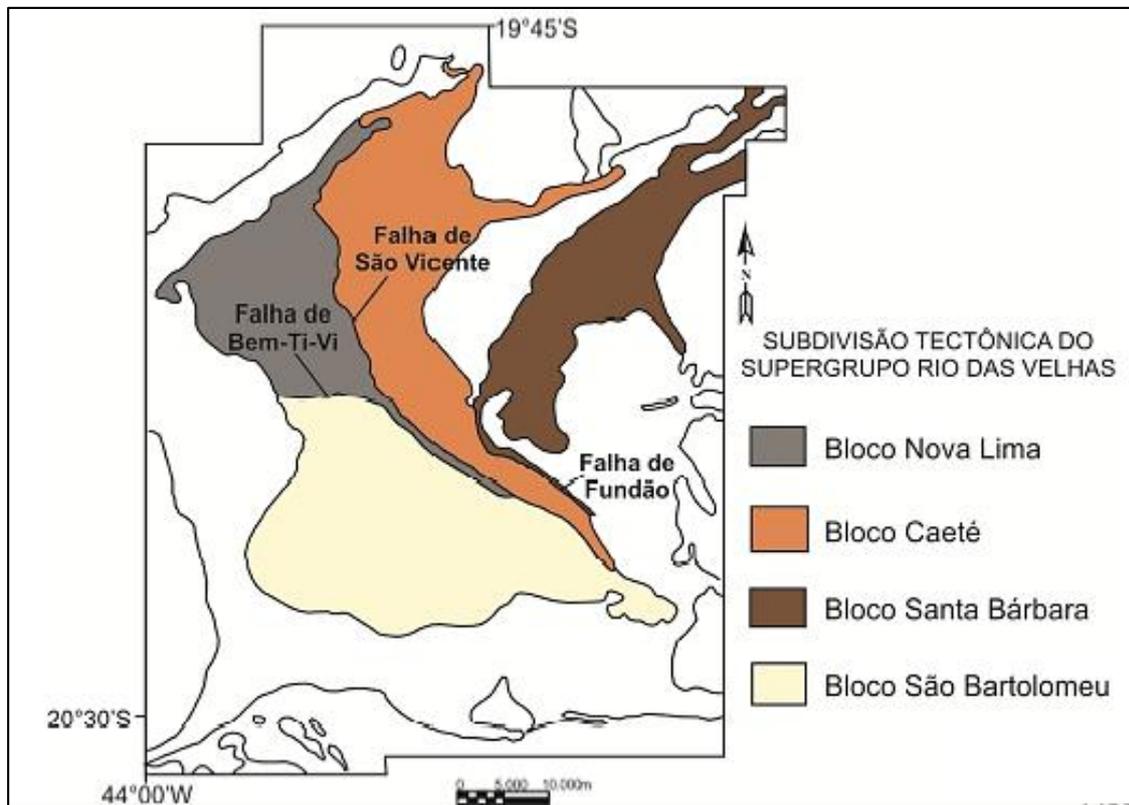


Figura 2.3 - Mapas de subdivisão dos blocos que subdividem o Supergrupo Rio das Velhas (Baltazar & Zucchetti 1996).

O Bloco Nova Lima é caracterizado da base para o topo por sequências metavulcânicas básica-ultrabásica, metavulcanoclástica e metassedimentar, com ausência do Grupo Maquiné. O Bloco Caeté ocorre na porção central do QFe, com a Falha de São Vicente, marcando o limite com o Bloco Nova

Lima, e é o único que apresenta a sequência estratigráfica completa do *Greenstone*. O Bloco Santa Bárbara ocorre a extremo leste, caracterizado pelo predomínio de unidades metassedimentares clásticas e metavulcânicas ultramáficas da porção basal, e separa-se do bloco Caeté pela Falha de Fundão. E a sul, bordejando o Complexo Bação, ocorre o bloco São Bartolomeu, diferente dos demais domínios, pois neste é particular o metamorfismo de médio grau, de fácies anfibolito e a ausência de registros de rochas de vulcanismo básico-ultrabásico, característico do *greenstone* (Zucchetti & Baltazar 1996).

2.3.2 Trabalhos anteriores

Madeira (2016) realizou uma caracterização geofísica na região da zona de cisalhamento São Vicente, adjacente à área deste estudo. Por meio da gravimetria e magnetometria sua pesquisa identificou o traço da superfície de descolamento basal da Nappe Ouro Preto, além de uma região de compensação isostática local sob as rochas da Formação Moeda que compõem a estrutura da serra do Caraça, consequência da acomodação dessa concentração de carga sobre o embasamento e áreas de contraste magnético que se associa com as áreas de mineralizações auríferas. Ainda as análises radiométricas apresentaram áreas de ação hidrotermal, como o mapa de concentração de potássio, que ao longo da zona de cisalhamento São Vicente apresentou altos valores, com enriquecimento desse elemento nessa região, e o mapa de concentração de tório válido na detecção de estruturas e lineamentos mais superficiais. Ademais, Madeira (2016) detectou novos alvos potenciais para a detecção de ouro com profundidades estimadas e a detecção de uma conexão entre as zonas de cisalhamento São Vicente e São Bento em profundidade.

Oliveira (2014) realiza o estudo geofísico da região do lineamento córrego do sítio, área denominada Projeto Córrego do Sítio, caracterizada pela presença de minas em operação da AngloGold Ashanti, para caracterização de depósitos auríferos e definição de novos alvos de exploração com base na assinatura geofísica determinada. Para isso foi utilizado o banco de dados de aerolevante eletromagnético (SPECTREM) e magnético e gamaespectrométrico (HeliMAG). A área é dividida em três blocos estruturais SW onde predomina a ocorrência da unidade Córrego do Sítio, central com predomínio da unidade Santa Quitéria, e NE, onde ocorrem as duas unidades, com lentes de BIF e diques espessos.

Oliveira (2014) determina que lineamentos associados a zonas de cisalhamento e falhas transcorrentes são relacionados a estruturas D2 descritas por Baltazar & Zuchetti (2007), que por sua vez representam estruturas transamazônicas. Além disso, a dispersão dos lineamentos em várias direções indica a reativação de estruturas pelo evento Brasileiro. Oliveira (2014) realizou um modelamento das anomalias magnéticas de alguns alvos e determinou uma compressão diferencial ao longo do Anticlinal Conceição a partir da rotação anti-horária de mergulhos para NE durante a orogenia Brasileira,

proporcionando o caráter transpressional, relacionada às falhas transcorrentes. Assim, um modelo de frentes de empurrão, é capaz de explicar as estruturas e ocorrência de movimentos relativos entre os blocos, bem como a origem das mineralizações na região que estão associadas às falhas transcorrentes. Os indícios são de que o bloco central soergue em relação aos demais com o basculamento das fontes magnéticas evidenciados pelas variações bruscas nas anomalias magnéticas.

Quanto ao padrão geofísico de mineralizações, Oliveira (2014) determinou que os depósitos do tipo São Bento estão associados a áreas de desmagnetização e zonas de enriquecimento potássico, com trend preferencial NNE-SSW. Já os depósitos do tipo Córrego do Sítio são caracterizados pela ausência de anomalias magnéticas e forte correlação à radiometria, sendo este último método o mais eficiente para detecção de mineralizações desse tipo.

Oliveira (2014) indica que as anomalias detectadas da razão Th/K orientam a abrangência regional do sistema mineralizador do lineamento Córrego do Sítio, dada a distribuição de alvos do tipo São Bento, verificados no bloco NE. A partir da associação geofísica, observou-se uma possível extensão do lineamento São Bento para SW e alvos com características de depósito do tipo São Bento no bloco NE indica que o anticlinal Conceição foi compreendido totalmente pelo sistema orogênico. Depósitos do tipo Córrego do Sítio foram delimitados, porém pode se tratar de zonas estéreis, relacionados à zonas de alteração e não ao minério.

Uma análise estatística de lineamentos do Quadrilátero Ferrífero foi realizada por Sartorato (1998) com um estudo dos lineamentos a partir de imagem Landsat. Este trabalho permitiu visualizar a existência de três direções preferenciais, NE-SW, NW-SE e E-W.

Sartorato (1998) determina que os lineamentos NE-SW estão intimamente relacionados ao acamamento litológico e são mais recorrentes na região onde ocorrem rochas do Supergrupo Minas, na área da Serra do Curral e Gandarela, sendo que nas áreas que afloram o Supergrupo Rio das Velhas essa direção é menos intensa. Os lineamentos NW-SE são os mais evidentes nas imagens de satélite e quando avaliados nas litologias do Supergrupo Rio das Velhas, esses lineamentos se apresentam relacionados a uma tectônica de caráter dúctil. Além disso, pode-se observar um aspecto retilíneo dos lineamentos e podem estar ligados a um evento compressional, com as mineralizações auríferas da região seguindo este mesmo controle estrutural gerador dos lineamentos. E os lineamentos E-W apresentam pouca intensidade na área e tem como evento gerador o Ciclo Brasileiro. Das ocorrências, sua maior expressão se encontra na porção leste, e se relacionam a estruturas importante associados a falhas de cavalgamento, embora não esteja relacionado aos principais controles estruturais das mineralizações (Sartorato 1998).

2.3.3 O Lineamento Córrego do Sítio

O Lineamento Córrego do Sítio é uma das estruturas que se localiza na porção nordeste do QFe, na direção NE-SW, com grande importância econômica, pois abriga grandes depósitos auríferos da região. Lima (2012) propõe o termo “Lineamento Córrego do Sítio”, baseado no histórico de informações geológicas da área, que agrega à estrutura todos os depósitos atuais que obedecem ao alinhamento NE-SW com características litoestratigráficas semelhantes das mineralizações.

Esse lineamento ocorre sobre as rochas do Grupo Nova Lima, nas unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria, e compreende uma série de minas ao longo de todo lineamento (Figura 2.6). A norte do lineamento ocorrem inúmeros diques e sills metamáficos inseridos nas porções de formação ferrífera que se relaciona com a mineralização de ouro, e um padrão de lineamentos de direção NW-SE relacionados à geomorfologia, coincidentes com drenagens, vales e quebras de relevo (Porto 2008, Roncato Jr. 2016).

Essa estrutura está inserida no contexto regional do Anticlinal Conceição, caracterizado como uma dobra homoclinal, com direção NE-SW e mergulho para SE (Figura 2.4). Nesse contexto, a estratigrafia do Supergrupo Rio das Velhas ocorre invertida, condicionada por dois sistemas de falhas, o de Fazendão e o de Fundão-Cambotas. Esse sistema de falhas que é responsável pela inversão estratigráfica, devido aos seus esforços compressivo-transpressivo e o transporte tectônico E-W, do último evento tectônico Brasileiro, que, por sua vez, é consequência do cavalgamento do Complexo Santa Bárbara sobre as supracrustais. Também é marcante uma família de lineamentos interpretados, como de natureza transcorrente ou oblíquos, de direção principal NW-SE (Pereira *et al.* 2013). Essas últimas estruturas ilustram as zonas de cisalhamento reativadas associadas às estruturas de segunda geração (D2) da evolução estrutural dessas rochas (Oliveira 2014).

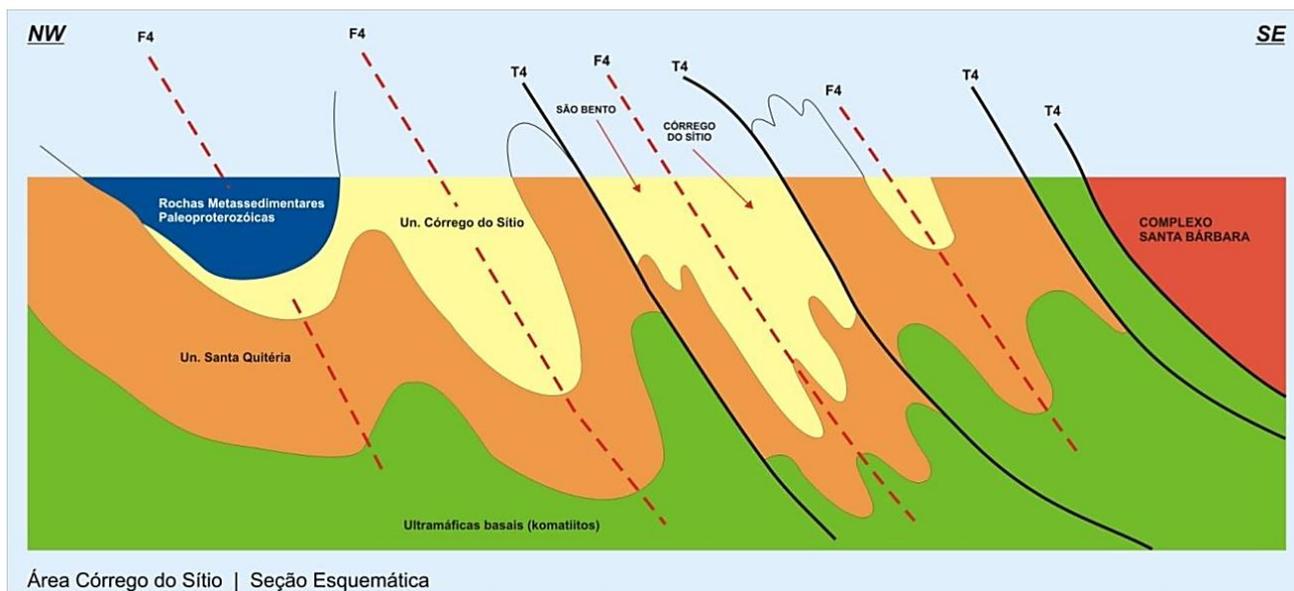


Figura 2.4 – Perfil esquemático NW-SE, representando a inversão estratigráfica devido ao empurrão do Complexo Santa Barbara sobre o Grupo Quebra Ossos e demais unidades (Lima 2012).

Lima (2012) caracteriza a mineralização do Lineamento Córrego do Sítio ao longo de zonas de cisalhamento de caráter dúctil transpressivo, ao longo de rochas metamorizadas associadas a veios de quartzo-carbonato-sulfeto, hospedados em sequências de metagrauvacas e metapelitos carbonosos, polideformados. Mais precisamente a mineralização ocorre em lentes sericíticas e veios com sulfetação disseminada fina, acompanhando a foliação (NE-SW). Esses elementos permitem classificá-lo com um depósito aurífero do tipo *lode gold* orogênico, no sentido de Groves *et al.* (1998). Essa estrutura é uma continuação de outros dois lineamentos paralelos na área, o São Bento e o Cristina, os quais abrigam diferentes tipos de depósitos de ouro, associados a depósitos em BIF's e de sulfetação maciça (Lima 2012, Oliveira 2014).

2.3.4 Unidades litoestratigráficas

Zucchetti *et al.* (1996) apresentam o Supergrupo Rio das Velhas divididos Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné, com subdivisões em Formações e Unidades e a descrição do litotipo componente e a ambiência de sedimentação (Quadro 2.1). Baltazar & Zucchetti (2007) sugerem a reorganização da coluna litoestratigráfica com a subdivisão do Supergrupo Rio das Velhas em associações de litofácies organizadas em ciclos sedimentares (Figura 2.5). O Grupo Nova Lima, da base para o topo compõe as sequências máfica-ultramáfica e metavulcânica-plutônica, seguida de outras sequências metavulcano-sedimentar química, metassedimentar química pelítica, metavulcano-sedimentar clástica, e por fim, sequências metassedimentares clástica marinha ressedimentada. O Grupo Maquiné foi caracterizado

como uma associação metassedimentar clástica não marinha, subdivididas em formações, de fácies litorânea e fácies fluvial. Vale ressaltar que a distribuição dessas rochas não é homogênea na área de total do greenstone.

Quadro 2.1: Coluna estratigráfica idealizada para o Supergrupo Rio das Velhas (Zucchetti *et al.* 1996).

SUPERGRUPO RIO DAS VELHAS	Grupo Maquiné	Ambiência	Formação/Unidade	Litotipo
	Grupo Nova Lima	Associação metassedimentar clástica não marinha (litorânea e fluvial)	Casa Forte ----- Palmital	Quartzito, conglomerado ----- Quartzo xisto
		Associação metassedimentar clástica marinha (ressedimentada)	Mindá Córrego da Paina Faz. Velha Córrego do Sítio Pau d'óleo Catarina Mendes	Metaturbiditos arenosos e argilosos Metagrauvacas, calcissilicáticas
		Associação metavulcanossedimentar clástica	Mestre Caetano Ribeirão Vermelho	Metagrauvacas, metavulcanoclásticas Metavulcanoclásticas, metaturbiditos
		Associação metassedimentar química-pelítica	Metaturbiditos arenosos e argilosos	Metapelitos e BIF's
		Associação metavulcanos-sedimentar química	Morro Vermelho	Metavulcânicas, metapelitos, BIF's
		Associação metavulcânica plutônica	Ouro Fino Complexo Quebra Córrego dos Ossos Boiadeiros	Metavulcânicas básicas e ultrabásicas Metavulcânica ultrabásica Sill básico-ultrabásico
		Máfica-ultramáfica		

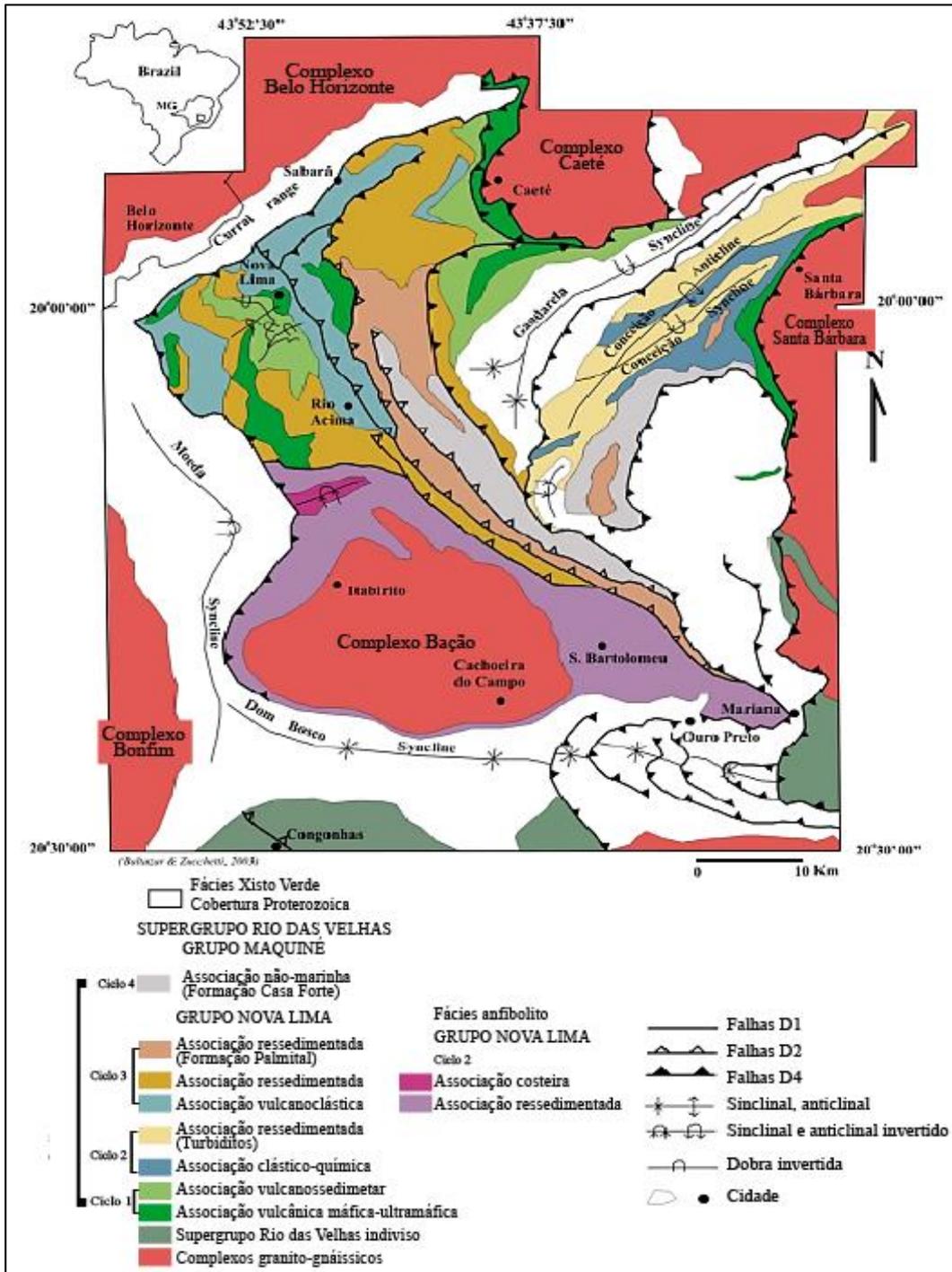


Figura 2.5 - Mapa geológico simplificado do QFe com as associações de litofácies do Supergrupo Rio das Velhas (modificado de Baltazar & Zucchetti 2007).

A região estudada se localiza no Bloco Santa Bárbara e a Figura 2.6 apresenta o mapa geológico da área de estudo. Nesta seção serão detalhadas as unidades litológicas do Supergrupo Rio das Velhas que se encontram nessa área segundo Zucchetti *et al.* (1996).

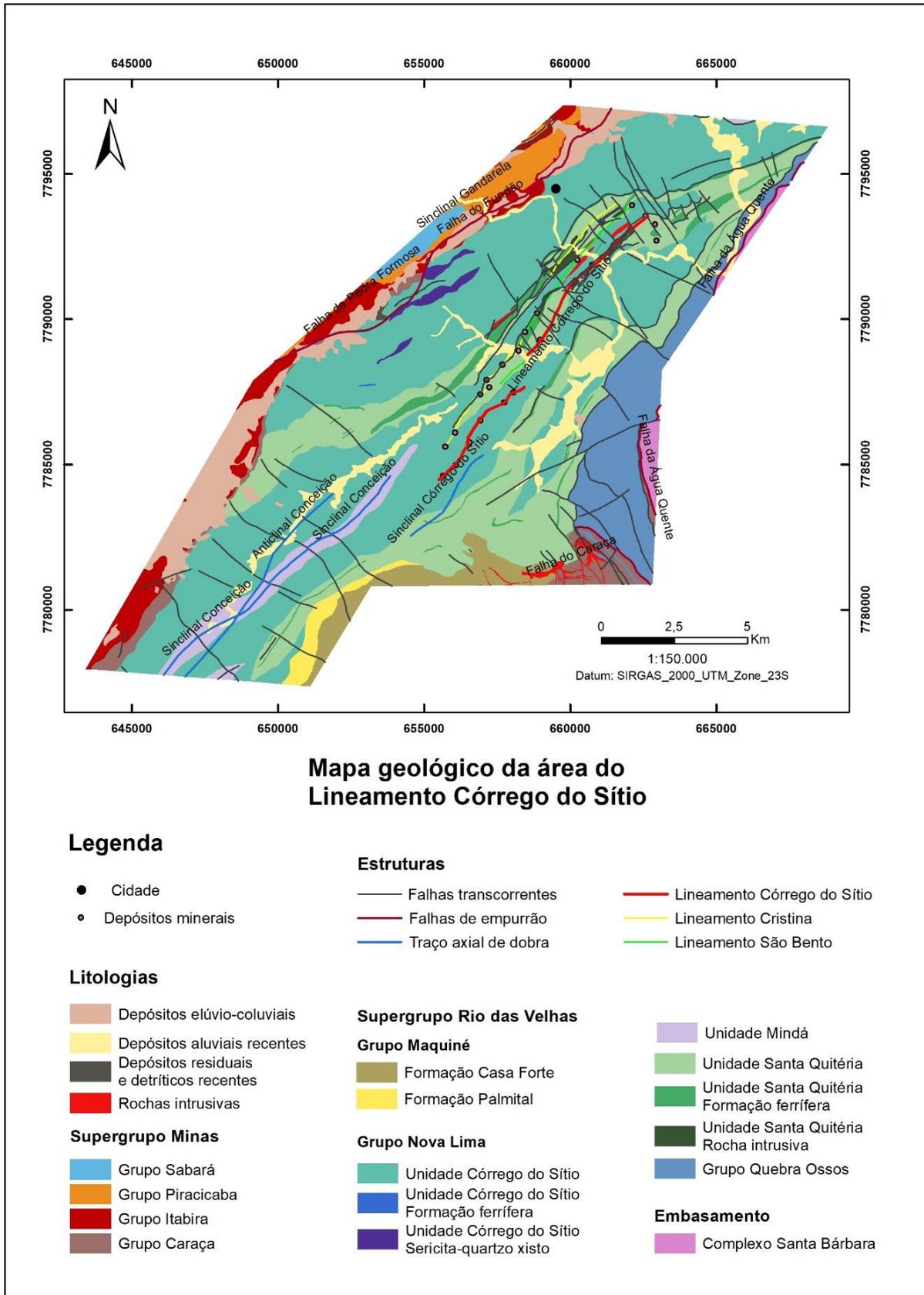


Figura 2.6 - Mapa geológico da área de estudo (modificado de CPRM 2014).

2.3.4.1.1 Grupo Nova Lima

Nesse Grupo predomina a ocorrência de rochas metavulcânicas máficas a ultramáficas, metavulcanoclásticas e metassedimentares, químicas e clásticas, de grau metamórfico xisto verde, compartimentada em unidades descritas a seguir.

Unidade Quebra Ossos

Essa unidade é constituída, essencialmente, por komatiitos peridotíticos de coloração verde escura a negra de granulação fina a muito fina. A mineralogia dessas rochas é resultante de alteração hidrotermal, composta essencialmente por talco, clorita, actinolita, tremolita, carbonato e serpentina, com o aspecto sedoso devido a esses minerais. Apresentam estruturas típicas de *pillow lavas*, brechadas e textura *spinifex*, com níveis finos de deposição clasto-química de formação ferrífera pobre em ferro, metachert fuchsítico, turmalinito e filito carbonoso. Ocorrem poucas exposições dessa rocha, sendo que sua melhor ocorrência se encontra na Pedreira Um, com peridotitos com alto teor de óxido de magnésio (MgO).

Unidade Santa Quitéria

A unidade Santa Quitéria caracteriza-se pela ocorrência de xistos sericíticos e cloríticos, com intercalações de filitos carbonosos, presença de pirita limonitizada e carbonatação, alternadas com formações ferríferas bandadas (BIF's), em faixas estreitas e contínuas, de fácies óxido com grande quantidade de magnetita. Ocorre também rochas intrusivas localizadas principalmente nas BIF's. Encontra-se em contato tectônico por falha de empurrão com as unidades Mindá, Córrego do Sítio e o Grupo Quebra Ossos.

Unidade Córrego do Sítio

Essa é uma das unidades do Grupo Nova Lima mais amplamente encontrada no Quadrilátero Ferrífero, composta, principalmente, por metapelitos carbonosos a micáceos com lentes de metapsamito, com lentes de xisto quartzo-sericítico e formação ferrífera bandada. Esses metapelitos caracterizam ciclos deposicionais granocrescentes em sequência rítmica compatíveis com uma sequência turbidítica, com granulação que varia de média a fina. Na porção nordeste, onde a ocorrência é mais abundante, essas rochas apresentam foliação milonítica e estruturas primárias bem preservadas, e intensa alteração hidrotermal, com zonas de sulfetação, carbonatação e silicificação que compreende grande parte da mineralização aurífera. O contato que essa unidade faz com o Grupo Maquiné e demais rochas do Grupo Nova Lima é tectônico, definido por falha de empurrão.

Lima (2012) propõe uma subdivisão estratigráfica local da Unidade Córrego do Sítio em Superior, onde predominam metagrauvas com lentes de filito carbonoso subordinadas, em Intermediária, sendo nesta porção que abriga xistos carbonosos, com zonas heterogêneas de

cisalhamento que hospedam a maior parte das zonas de mineralização de ouro, e inferior, composta por Metagrauvas intercaladas com metapelitos carbonosos com lentes de formação ferrífera.

Unidade Mindá

Caracterizada pela presença predominante de metapsamito, marcada pela intercalação com metapelito, formação ferrífera bandada e xisto carbonoso. São xistos de coloração escura com granulação fina a média, e apresentam bandamento metamórfico, marcado pela alternância de níveis filossilicáticos com níveis quartzosos. Observa-se também ciclos deposicionais que caracterizam depósitos turbidíticos. Essa unidade possui, comumente, assinatura de enriquecimento por urânio e tório em resposta geofísica, devido sua posição próxima ao granitoide Peti, sudeste da região estudada. O contato com a unidade Córrego do Sítio é transicional e, em outros pontos, faz contato com rochas do Grupo Maquiné e demais rochas do Grupo Nova Lima por meio de uma falha de empurrão.

2.3.4.1.2 Grupo Maquiné

Formação Palmital

Ocorre a nordeste do QFe, e constitui-se de xisto com intercalação de quartzitos micáceos, que representam a origem clástica dos sedimentos, depositados em ambiente marinho raso a litorâneo. Esses xistos são metargilitos, metarenitos finos e matagrauvas, com estruturas primárias preservadas. Ocorre em contato brusco com a unidade Córrego do Engenho, e tectônico por falha de empurrão com a formação Casa Forte e unidade Córrego do Sítio.

Formação Casa Forte

Constitui-se da base para o topo, de quartzitos finos com intercalações de metaconglomerados polimítico a quartzitos médios com níveis conglomeráticos. O quartzito possui composição sericítica e granulometria fina na base a média nos níveis mais superiores, com a preservação das estruturas primárias. As espessuras são bastante variáveis e o tamanho dos clastos no metaconglomerado pode variar de seixos a matacões, compostos de formações ferríferas, *cherts* e xistos carbonosos. O contato entre a unidade basal e essa formação ocorre de forma transicional indicado pela diminuição na frequência de intercalações (de metaconglomerado a níveis conglomeráticos).

2.3.5 Evolução estrutural

Em trabalho de mapeamento mais recente mais especificamente na região do Lineamento Córrego do Sítio, Muniz (2017) determina uma região com acamamento bem preservado e apesar de ser uma região afetada por dobramentos e falhamentos, a intensidade foi baixa classificada de fácies xisto verde. A direção preferencial se dá por NE-SW e a morfologia atual expõe lineamentos NW-SE,

perpendicular ao *trend* regional e que repercute uma clivagem de fratura espaçada que se relaciona ao faturamento do embasamento durante a abertura da bacia. A evolução tectônica, segundo Muniz (2017), ocorreu em quatro fases deformacionais e estas se relacionam com a evolução do QFe segundo Alkmin & Marshak (1998). Tais fases são, D_n de caráter distensivo, com eixo de abertura NE-SW e fraturas direcionais NW-SE, que se associa com a abertura da bacia de deposição de sedimentos; D_{n+1} que é de natureza compressional e esforço tectônico SE-NW com a geração de dobras e falhas de empurrão de vergência NW; D_{n+2} que é oposta e se manifesta de forma distensional com um esforço NW-SE, na qual seria gerada uma clivagem de crenulação e intrusão de diques; e a fase D_{n+3} que é de natureza compressional, se caracteriza pela reativação das falhas de empurrão e fraturas e o desenvolvimento de falhas transcorrentes sinistrais com esforço E-W, com vergência para W.

3.1 INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos geofísicos se faz importante na compreensão das rochas em subsuperfície, quanto à sua disposição no espaço. As rochas diferem-se segundo propriedades físicas, provocando variações nas forças atuantes nelas, nos campos físicos e na propagação de ondas que nelas atuam. As propriedades que podem ser avaliadas para a distinção e interpretação das rochas são densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica e térmica, radioatividade, elasticidade e luminescência.

A caracterização geológico-geofísica do alvo não se atribui à identificação do alvo isolado, mas ao entendimento do seu significado físico no ambiente geológico em que se encontra. Envolve, portanto, o reconhecimento de relação espacial e temporal do alvo com o meio, a partir do contraste nas propriedades físicas da subsuperfície (Luiz & Silva 1995). E esse contraste nas propriedades físicas podem se referir a diferentes situações geológicas, já que essas situações são variadas e não contínuas no meio, possibilitando diferentes interpretações para um dado. É importante ressaltar que os métodos geofísicos são passíveis de ambiguidades e incertezas, sendo necessária a utilização de tratamento de dados que possam minimizar estes problemas (Kearey *et al.* 2009).

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos teóricos dos métodos geofísicos utilizados para a elaboração deste trabalho, sendo os métodos gravimétrico, magnetométrico e radiométrico para o estudo das estruturas, rochas e ocorrências minerais da região em questão.

3.2 GRAVIMETRIA

3.2.1 Introdução

A gravimetria baseia-se na medida da variação do campo gravitacional terrestre causado pelas diferentes distribuições de densidade em subsuperfície. O princípio de funcionamento desse método consiste em obter a atração que o material da subsuperfície exerce sobre uma determinada massa, que se encontra no instrumento de medida (Luiz & Silva 1995).

Todos os materiais que compõem a Terra influenciam no valor de gravidade, entretanto, o manto e o núcleo têm maior contribuição em comparação à crosta terrestre. As distorções nos valores normais são chamadas de anomalias, e são interpretadas como resultado de variações laterais na densidade desses materiais, provocadas por estruturas geológicas ou depósitos minerais.

Em média escala, as anomalias gravimétricas podem revelar a forma em subsuperfície de intrusões ígneas, como batólitos graníticos e maciços anortosíticos. De modo semelhante, levantamentos gravimétricos têm sido bastante empregados no estudo de localização, interpretação das estruturas e mecanismos de formação de bacias sedimentares (Kearey *et al.* 2009). Na prospecção geofísica, esse método é aplicado na procura de estruturas armazenadoras de petróleo, de gás e depósitos minerais de alta densidade, como cromita, ferro e sulfetos, e na exploração mineral pode ser um grande aliado na determinação de tonelagem de minério usando uma metodologia de excesso de massa. Os métodos gravimétricos têm aplicação em diversas áreas, contudo, quase sempre é empregada como técnica subsequente, usada sobre um alvo definido, pois pode ser substituída por outro método de melhor relação custo-benefício.

O estudo gravimétrico envolve diretamente a atração de massas e seu contraste regional. Essa atração é explicada pela Lei da Gravitação de Newton (Equação 3.1), em que a força de atração em módulo (F) entre duas massas (m_1 e m_2) é inversamente proporcional à distância (r) entre elas, onde a constante gravitacional (G) é o fator de proporcionalidade:

$$F = \frac{G.m_1.m_2}{r^2} \quad \text{Equação 3.1}$$

3.2.2 O Campo Gravitacional

O campo gravitacional é o campo em que essas partículas estão inseridas. Esse campo é conservativo, representado por uma função potencial, denominada potencial gravitacional. Esse potencial define uma superfície equipotencial, considerando a Terra esférica. Essa superfície se configura a nível do mar em qualquer ponto da Terra e é horizontal, portanto, forma ângulos retos com a direção da gravidade, que é vertical. Entretanto, é sabido que a Terra não possui geometria de uma esfera perfeita, chamada geoide, em que há um achatamento nos polos e abaulamento na região da linha do Equador. A aproximação de uma esfera perfeita é dada para fins de cálculos.

3.2.3 Densidade das rochas

A densidade das rochas depende da composição mineralógica e porosidade, entretanto, a densidade é o parâmetro menos variável (Tabela 3.1). Por exemplo, as rochas sedimentares são as que possuem maior variação devido à porosidade, assim, essas tendem a apresentar maior densidade quanto mais profundas, pois há maior compactação. As rochas ígneas tendem a ser mais densas quanto mais máficas (Kearey *et al.* 2009).

A variação densidade determina a anomalia, e se essa é positiva ou negativa, é chamada contraste de densidade (Equação 3.2). Para um corpo de densidade ρ_1 envolvido por um material de densidade ρ_2 , o contraste de densidade é dado por:

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$$

Equação 3.2

Tabela 3.1- Intervalos de densidade aproximados (mg/m^3) de alguns tipos de rochas e minerais de minério mais comuns (Modificado de Kearey *et al.* 2009).

Material	Densidade (mg/m ³)	Material	Densidade (mg/m ³)
Aluvião (saturado)	1,96-2,00	Anortosito	2,61-2,75
Argila	1,63	Basalto	2,70-3,20
Folhelho	2,06-2,66	Gabro	2,85-3,12
Arenito		Gnaisse	2,61-2,99
Cretáceo	2,05-2,35	Quartzito	2,60-2,70
Triássico	2,25-2,55	Anfibolito	2,79-3,14
Carbonífero	2,35-2,55	Cromita	4,30-4,60
Calcário	2,6-2,80	Pirrotita	4,50-4,80
Giz	1,94-2,23	Magnetita	4,90-5,20
Dolomita	2,28-2,9	Pirita	4,90-5,20
Halita	2,10-2,40	Cassiterita	6,80-7,10
Granito	2,52-2,75	Galena	7,40-7,60
Granodiorito	2,67-2,79		

3.2.4 Levantamento gravimétrico

O levantamento gravimétrico é realizado com o uso de um gravímetro, aparelho que mede valores relativos de gravidade, ou seja, as diferenças de gravidade entre locais e tais levantamentos podem ser terrestre, marinho ou aéreo e a escala varia de acordo com o objetivo do trabalho. Os gravímetros são basicamente balanças de mola de massa constante, de comprimento próximo a zero (os mais atuais), e as variações do peso da massa causadas pelas variações de gravidade fazem com que o comprimento da mola varie e, assim, medem a gravidade (Kearey *et al.* 2009).

Luiz & Silva (1995) determinam que os levantamentos terrestres são realizados em áreas que têm fácil acesso (estradas, caminhos ou margens de rios) ao longo de linhas abertas. No início do levantamento são escolhidas estações base que servem de referência outras medidas das áreas e essas

não podem ter interferência de outros tipos de vibrações, como vento, água, locais com movimento e tráfego. Assim, a coleta de dados se dá na medição na estação base no início de cada dia de trabalho e a medição na sequência das estações, sempre registrando o horário de cada uma. A cada 3 horas deve-se extrair uma medida da estação base a fim de se manter o controle da variação instrumental, e a à medida que se aumenta a distância da estação base, é necessário definir uma nova estação base para otimização do levantamento, mantendo sempre valores aproximados dos iniciais. Durante a medida o gravímetro se encontra no nível do terreno suportado por um equipamento que garante o nivelamento do aparelho em posição horizontal em relação ao solo, seja em terrenos planos ou acidentados. É importante que os levantamentos terrestres sejam realizados juntamente ao levantamento altimétrico, cujos dados serão utilizados para a realização das correções necessárias para os dados gravimétricos.

Os levantamentos marinho e aéreo são realizados com auxílio de embarcações e aeronaves que devem ser mais estáveis, em que o efeito do balanço dos meios de transporte e o ambiente cause menor interferência possível. O levantamento marinho pode ser feito no fundo ou na superfície das águas e os seus desafios são de localização das estações, necessário um potente sistema de radioposicionamento, e a estabilização dos gravímetros no ambiente marítimo, com influência de ondas e correntes. Para o levantamento na superfície as embarcações se mantêm em movimento durante todo o levantamento em uma rota em linha reta. Nelas são posicionadas plataformas estabilizadoras para menor interferência possível. As medidas de fundo são mais lentas que as de superfície, com gravímetros descidos até o assoalho oceânico e posicionados e nivelados para se obter as medidas e retornados à embarcação (Luiz & Silva 1995). Os levantamentos aéreos devem ser realizados em altitudes e velocidades aproximadamente constantes e monitoradas para posterior correção. Esses dois tipos de levantamento devem ser corrigidos o efeito Eotvos, sendo o efeito sobre o levantamento aéreo muito maior, e por isso este é menos empregado.

Na prospecção de minério o levantamento terrestre é o mais adequado, sendo o que é o melhor aplicado à escala de detalhe maior e ainda apresenta menores erros de leitura, porém sempre empregado associados à outros métodos geofísicos, pois complementam e confirmam anomalias. O levantamento aéreo e marinho é mais empregado para reconhecimentos de estudos tectônicos de escala menor e em prospecção de petróleo (Luiz & Silva 1995).

3.2.5 Tratamento dos dados

Os resultados dos valores de gravidade variam com a latitude, a elevação e a quantidade de massa nas elevações (topografia). Além disso, ainda há variações causadas pelos instrumentos de medida e de marés, pela atração gravitacional produzida pelo sol e lua (Luiz & Silva 1995). Para

minimizar os erros durante a aquisição dos dados, é feita a correção segundo as variações do campo gravitacional da Terra. As principais correções são descritas a seguir.

Uma das correções mais importantes é a correção instrumental, necessária em função da instabilidade do equipamento, como descrita anteriormente. Para os cálculos, assume-se como a variação sendo linear, e o valor da gravidade da base fixa é subtraído do valor medido no levantamento, tendo-se a diferença numérica para encontrar os valores absolutos de gravidade na área levantada (Kearey *et al.* 2009). Para minimizar esse efeito, o *drift* é monitorado com um gravímetro fixo em uma posição, realizando repetidas leituras ao longo do dia. Outra correção que deve ser feita em relação ao tempo é a correção de marés, pois a gravidade medida num local fixo varia com o tempo, devido a oscilação periódica dos efeitos gravitacionais do sol e da lua, associados a seus movimentos orbitais. Considerando que as marés têm variações previsíveis e periódicas, gerando oscilações de até 0,3mgal na aceleração gravitacional, é possível monitorar e fazer tal correção em *softwares* a partir das coordenadas geográficas e temporais (Telford *et al.* 1990).

Também é realizado ajustes em função da posição, que é a correção de latitude, feita devido a forma não esférica da Terra. A gravidade tem variação segundo a latitude, pois a velocidade de aceleração de gravidade varia sobre a superfície da Terra em função do seu formato assimétrico, máxima no Equador e mínima nos polos (Kearey *et al.* 2009). Portanto, é necessária uma correção para remover o efeito de aumento da atração gravitacional em direção aos polos (Equação 3.3), devido à rotação da Terra e da diferença do raio na região do Equador, a partir da equação:

$$C_L = g_1 - g_0 \approx 5162,83 (\sin^2\theta_1 - \sin^2\theta_0)$$

Equação 3.3

São realizadas também as correções de elevação, em que a altitude é considerada porque uma estação em um ponto mais elevado estará mais afastada do centro da Terra e sofrerá a influência dos materiais situados abaixo. As correções realizadas para essa situação são denominadas *Free-air*, Bouguer e de Terreno (Kearey *et al.* 2009) (Figura 3.1).

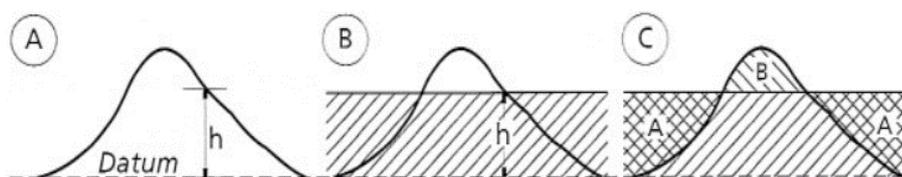


Figura 3.1- (A) A correção de ar livre para uma observação numa altura h acima do datum; (B) A correção Bouguer. A região sombreada corresponde a uma placa de rocha de espessura h estendendo-se ao infinito em ambas as direções horizontais; (C) A correção de terreno (Kearey *et al.* 2009).

Correção de Ar-livre

A correção de Ar-livre corrige os efeitos de interferência de massa e altitude nos valores de gravidade, reduzindo os dados de determinada altitude da estação gravimétrica a um *datum* de referência, que geralmente é o nível do mar, e desconsidera a quantidade de massa entre esses dois pontos (Luiz & Silva 1995).

Essa correção é realizada calculando-se a diferença da aceleração gravitacional entre o nível médio das marés e a estação observada a uma altitude h (em metros) (Luiz & Silva 1995). A gravidade no nível de referência é apresentada por Equação 3.4:

$$|g_h| = \left| \frac{GM}{(r)^2} \right| \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde, G é a aceleração da gravidade, M a massa e r a distância no nível de referência. Logo, a aceleração da gravidade em uma altitude h será (Equação 3.5):

$$|g_h| = \left| \frac{GM}{(r + h)^2} \right| \quad \text{Equação 3.5}$$

A correção de Ar-livre (CAL) (Equação 3.6), portanto, é calculada a partir da variação da gravidade entre o geóide de referência e o ponto observado:

$$CAL = \Delta g = g - g_h \approx \frac{GM}{r^3} = 0,3086h \quad \text{Equação 3.6}$$

Tem-se então, gravidade teórica (gh) para qualquer altitude (h) através da Equação 3.7:

$$gh = g - CAL \quad \text{Equação 3.7}$$

É importante ressaltar que a CAL não abrange nenhum efeito gravitacional provocado pelas rochas entre a superfície real de medida e o *datum* gravimétrico, eliminando-se, nesse processo, apenas a variação de altitude ortométrica (Luiz & Silva 1995).

Correção de Bouguer

A correção de Bouguer (C_B) é usada para estudar as perturbações no campo gravitacional provocadas pela massa entre o ponto de estudo e o geóide, com a intenção de corrigir o excesso de massa

ou a falta dela, entre a superfície de referência e a superfície verdadeira (Telford *et al.* 1990, Luiz & Silva 1995, Blakely 1996). Para isso, aplica-se a Equação 3.8:

$$C_B = 2 \pi G \rho h = 0,04185 \rho h$$

Equação 3.8

Em que h é a altitude ortométrica da estação (em metros) e ρ é a densidade do pacote rochoso. O cálculo da correção Bouguer (C_B) é dado pela hipótese de que a massa em torno do ponto amostrado é uma placa de extensão infinita com densidade ρ e espessura equivalente a altura h . Em áreas continentais, costuma-se utilizar a densidade média das rochas de 2,67g/cm³ e em áreas oceânicas de 2,80g/cm³ (Blakely 1996).

Correção de terreno

Quando o relevo for muito acidentado, a correção de Bouguer é incompleta, pois essa superfície se encontra muito acima ou muito abaixo da superfície de referência. Dessa forma, a correção de terreno se faz necessária em uma região onde há grande variação de altitude, calculando a correção do preenchimento ou remoção das massas acima ou abaixo da topografia de referência (h) em cada estação. Quando a variação da altitude é muito pequena, considera-se um h constante, sem a necessidade da correção. Essa metodologia é aplicada com base em modelos digitais de terreno, que calculam pontualmente a atração gravitacional de cada coordenada a fim de melhorar a qualidade das informações e assim na geração dos mapas gravimétricos (Telford *et al.* 1990).

3.2.6 Anomalias gravimétricas

As anomalias gravimétricas são dadas pela diferença entre o valor previsto de gravidade e o valor medido em um ponto na superfície da Terra, considerando as correções devidas para tal situação (Telford *et al.* 1990). A magnitude e a forma de uma anomalia dependem do contraste de densidade dos materiais, da profundidade e da geometria do corpo.

A anomalia Bouguer (A_B) é uma base para a interpretação de dados gravimétricos, considerando-se a superfície como uma placa plana infinita de altura coincidente com a altitude e a densidade igual à densidade média das rochas e depende da C_T (Telford *et al.* 1990). A anomalia de ar livre (A_{AL}) é dada pela diferença entre a aceleração da gravidade observada e da calculada. A partir desta é possível estimar o grau de compensação isostática de uma área (Kearey *et al.* 2009).

A anomalia Bouguer é dada pela Equação 3.9:

$$A_B = g_{obs} - g_{teorico} - C_{AL} - C_B + C_T \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde g_{obs} é o valor da gravidade medida corrigida de maré e *drift*, $g_{teorico}$ é o valor da gravidade teórica, C_{AL} é a correção de Ar-livre, C_B é a correção Bouguer e C_T é a correção de terreno.

Uma vez calculada a CAL, obtém-se a anomalia gravimétrica Ar-livre (A_{AL}). Para tal anomalia, basta reduzir do valor gravimétrico medido em campo (g_{obs}), corrigido da maré e drift, o valor da gravidade prevista para a altitude de medida (gh) (Equação 3.10).

$$A_{AL} = g_{obs} - g_h = g_{obs} - g_h + 0,3086h \quad \text{Equação 3.10}$$

A anomalia de Ar-livre (A_{AL}) também pode ser obtida a partir da equação 3.9, somando-se a correção de Bouguer e removendo-se a correção de terreno, tendo a Equação 3.11:

$$A_{AL} = g_{obs} - g_{teorico} - C_{AL} \quad \text{Equação 3.11}$$

As anomalias podem ser interpretadas de forma direta ou indireta. A interpretação direta fornece informações sobre o corpo anômalo a partir de diferentes métodos. Um deles é a profundidade-limite, que se refere à máxima profundidade na qual o topo de um corpo poderia se localizar e ainda produzir uma anomalia gravimétrica observável e independentes da forma real do corpo. Outro método é o excesso de massa, sem necessitar a suposição sobre sua forma, profundidade ou densidade, somente entre a diferença de massas do corpo e da rocha encaixante que preencheria o espaço ocupado pelo corpo. Ainda se pode se estimar a espessura e limite do corpo, pelos métodos de ponto de inflexão dos perfis gravimétricos e pelo contraste de densidade respectivamente (Kearey *et al.* 2009).

Na interpretação indireta, o corpo causador de uma anomalia gravimétrica é simulado por um modelo cuja anomalia teórica pode ser calculada, e a forma do modelo é alterada até que a anomalia calculada se iguale aproximadamente a anomalia observada. É feita por meio da comparação da anomalia observada com a anomalia calculada e modelada a certas formas geométricas, cujo tamanho, posição, forma e contraste de densidade são ajustados para o modelo trabalhado. Essas anomalias podem ser bidimensionais, calculadas para cilindros horizontais ou meio cilindro, ou tridimensionais, comparadas com cálculo de esferas, cilindros verticais ou prismas retangulares retos (Kearey *et al.* 2009).

3.3 MAGNETOMETRIA

3.3.1 Introdução

O uso de medidas magnéticas na prospecção baseia-se nas concentrações de minerais magnéticos nas rochas que formam a crosta terrestre e as distorções locais que elas produzem no seu campo magnético, que são a intensidade desse campo, a declinação e inclinação magnética.

Os minerais que são responsáveis pelas perturbações do campo terrestre são óxidos e sulfetos altamente magnéticos como magnetita, pirrotita e ilmenita. Eles são considerados uma forma de guia quanto à distribuição de minerais não magnéticos que são economicamente importantes, que estão a eles associados, por exemplo, calcopirita, galena, ouro, etc. Além da orientação na localização de minerais economicamente explorados, as propriedades desses minerais são essenciais na localização de contatos e estruturas geológicas de forma remota, por meio do método potencial conhecido por magnetometria.

3.3.2 O campo magnético terrestre

Assim como um ímã, a Terra possui dois polos em que a força magnética é maior e com diferenças de cargas. Esses polos encontram-se nas extremidades, em relação ao norte e ao sul geográfico. Essa diferença de carga produz linhas de força pelo movimento dos elétrons (Figura 3.2), tal força, portanto, tem origem interna e produz um campo magnético terrestre. Ela é explicada pela Teoria do Dínamo que, a partir do movimento das cargas e em função da rotação terrestre correntes elétricas, circulam no núcleo líquido e ferroso da Terra, sendo então essa corrente elétrica capaz de gerar um campo magnético ao seu redor.

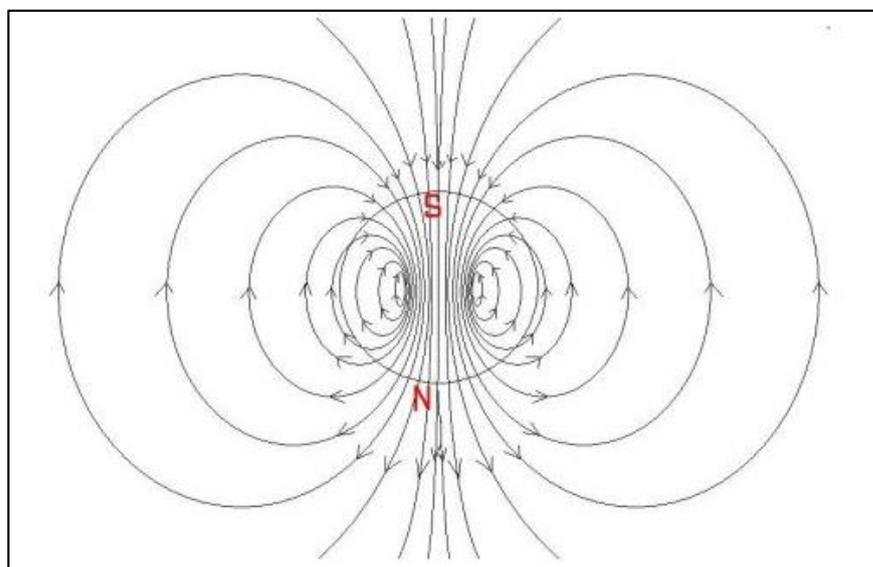


Figura 3.2 - Representação das linhas de força do campo magnético terrestre (Halliday 1996).

Dessa forma, esse campo assemelha-se a um dipolo magnético, com os polos próximos aos polos geográficos da Terra, com um eixo de inclinação de cerca de $11,5^\circ$ em relação ao eixo de rotação terrestre (Luiz & Silva 1995) (Figura 3.3).

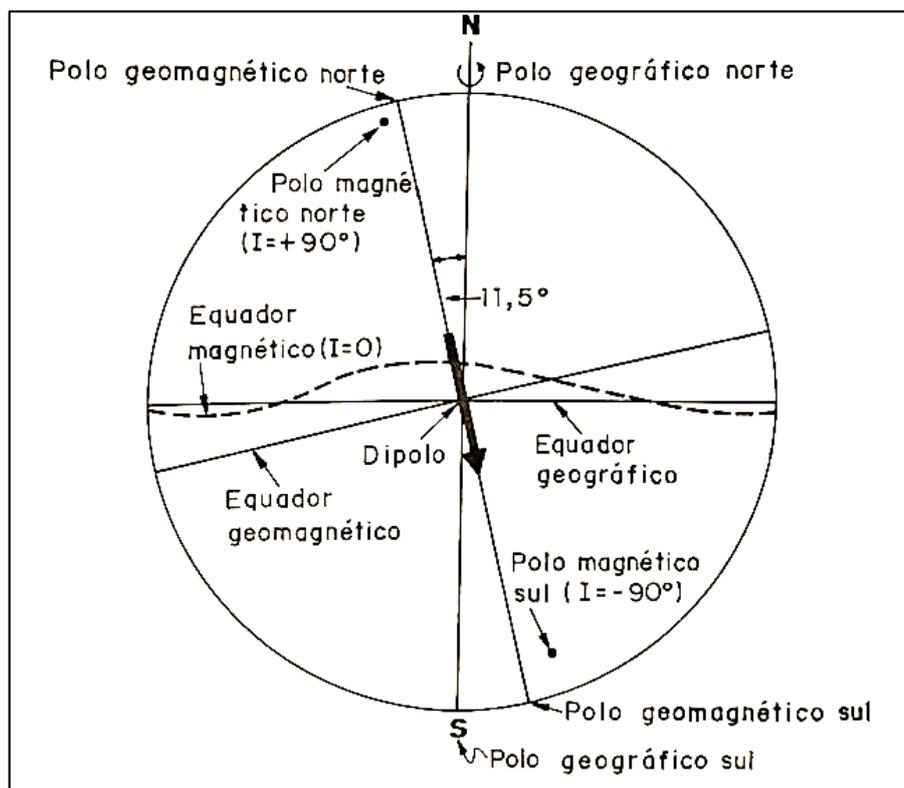


Figura 3.3 - Representação esquemática de distinção entre os magnéticos, geográficos e geomagnético (Luiz & Silva 1995).

3.3.3 Susceptibilidade magnética dos materiais

A susceptibilidade magnética é a capacidade de um material em magnetizar-se sob influência de um campo magnético. Os materiais e as substâncias apresentam diferentes comportamentos quando submetidos a um campo magnético, podem ser atraídas ou repelidas, sendo, portanto, divididos em: diamagnéticos, os quais adquirem fraca magnetização no sentido contrário do campo, por isso são repelidas; os paramagnéticos, que possuem fraca magnetização, mas no mesmo sentido do campo, assim são atraídos; e os ferromagnéticos, com elevada susceptibilidade e de magnetização muito forte no mesmo sentido do campo, assim são fortemente atraídos.

Os minerais responsáveis pela detecção do campo magnético e pela magnetização dos materiais geológicos são ferromagnéticos, capazes de produzir anomalias detectáveis por levantamentos geofísicos de magnetometria e tais minerais são a magnetita, a pirrotita e a ilmenita (Luiz & Silva 1995).

Para o fornecimento desses valores de anomalias e seus contrastes, a susceptibilidade magnética das rochas depende, principalmente, da quantidade, dos tamanhos e da distribuição dos grãos contidos. As rochas sedimentares, por via de regra, são as que apresentam menores valores de susceptibilidade magnética. As rochas metamórficas apresentam também baixa susceptibilidade, entretanto, a presença de estruturas rúpteis-dúcteis nessas rochas favorece um acúmulo de minerais ferromagnéticos, assim obtêm-se respostas de alta magnetização local. Nas rochas ígneas, esse valor é variável, a depender da sua gênese, mas apresentam os maiores valores de susceptibilidade encontrados. As rochas ígneas máficas, por conter maior teor de ferro, tendem a ter maior potencial de magnetização, ao contrário das rochas félsicas, que em geral possuem uma susceptibilidade menor em relação àquelas (Kearey *et al.* 2009) (Figura 3.4).

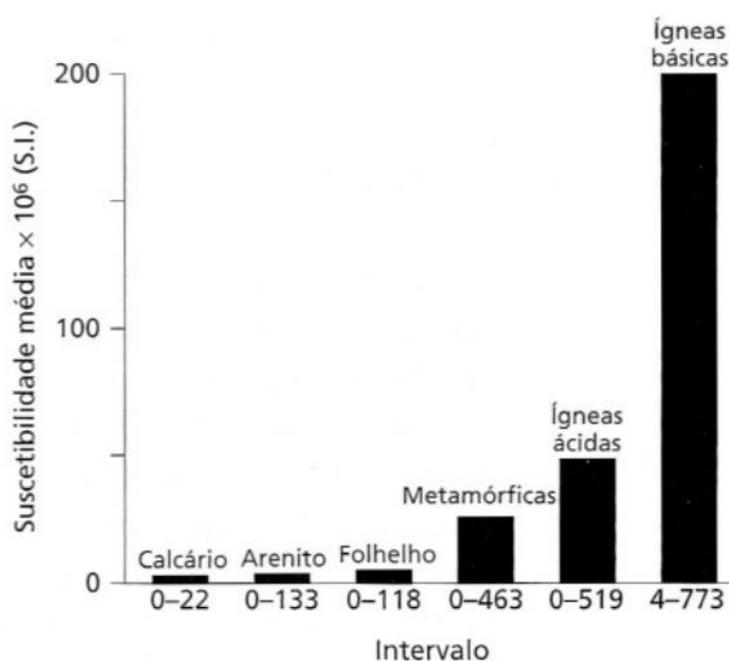


Figura 3.4 - Gráfico de valores médios e intervalo de susceptibilidade das rochas (Kearey *et al.* 2009).

3.3.4 Levantamento magnetométrico

O método geofísico magnético é rápido e barato, de principal uso na prospecção. O levantamento pode ser aéreo, terrestre ou marinho. Os levantamentos aéreos (com helicóptero ou avião) e marinhos (embarcações) são realizados para reconhecimento de uma área de grande extensão, como na prospecção de petróleo e com informações de potencialidade econômica mineral. O levantamento terrestre é usado para fins de pesquisa na fase de detalhamento de uma área (Luiz & Silva 1995).

O instrumento utilizado é o magnetômetro, sendo os principais podendo ser o *fluxgate* construído com bobinas envolvidas com material ferromagnético, a fim de gerar um campo magnético, o de Precessão Nuclear, consistindo em um sensor com uma fonte e um contador eletrônico que mede a

frequência de precessão dos prótons dentro, e de Bombeamento Ótico, que tem uma fonte luminosa que excita os elétrons e a diferença de energia entre os subníveis durante o seu deslocamento é proporcional ao campo magnético terrestre. Nesse último equipamento, os elementos mais usados são o céσιο, rubídio, sódio ou hélio, pois fornecem medidas mais precisas devido ao tamanho do átomo e a sua grande vantagem é que mede elevados gradientes magnéticos, por exemplo nos casos onde há depósitos de ferro (Luiz & Silva 1995).

Durante os levantamentos aéreos, utiliza-se apenas um equipamento instalado na aeronave, sendo os mais comuns os de precessão nuclear e de bombeamento ótico. A amostragem deve ser feita segundo uma malha de voo, ao longo de linhas transversais ao alvo, cobrindo todo o terreno delimitado de uma pesquisa. Essa malha é formada pelas linhas de produção, que são aquelas transversais à estrutura alvo, e pelas linhas de controle, normal às de produção, com a finalidade de controlar possíveis variações na leitura do equipamento (Luiz & Silva 1995). No levantamento aéreo, o voo deve manter uma altitude constante e não muito elevada em relação ao terreno, isso porque o aumento da altitude interfere nas medidas de campo, ocorrendo a diminuição da magnitude e da resolução das anomalias, por exemplo distorções como alargamento dessas (Kearey *et al.* 2009).

3.3.5 Anomalias magnéticas

A anomalia magnética de um corpo contém elementos negativos e positivos gerados pela natureza dipolar do magnetismo (Kearey *et al.* 2009). Além disso, a intensidade de magnetização é um vetor e a direção de magnetização de um corpo controla a forma de sua anomalia magnética.

Portanto, corpos com mesma forma podem gerar anomalias distintas, pois a intensidade de magnetização depende do tamanho, forma, quantidade e distribuição de minerais ferrimagnéticos na rocha. Ainda assim, a anomalia magnética independe da unidade de distância utilizada, pois depende, essencialmente, das propriedades do corpo (Kearey *op. cit.*).

3.3.6 Tratamento dos dados

Os dados coletados passam por um tratamento de correção com a remoção das variações causadas por fatores externos e variações por efeito de latitude e diferenças no campo magnético terrestre. Além disso, realiza-se a filtragem dos dados com o propósito de remover ou ressaltar informações das heterogeneidades do meio.

A principal correção é a geomagnética, que para definir a anomalia, é necessária a remoção do efeito do campo magnético de referência ou normal, o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), de cada medida tomada. Outra correção que é feita normalmente para levantamentos terrestres, é a variação

diurna, com variação temporal do campo medido, isso porque a ionosfera sofre variações diárias que interferem nos valores do campo magnético, portanto, a remoção dessa interferência aproxima os dados coletados de um valor real mais constante. Por fim, há também a correção de elevação do terreno, mas essa não é sempre aplicada, pois as técnicas dessa correção não são bem conhecidas e os casos são muito variáveis. Portanto, o que se faz é minimizar esse efeito durante o levantamento, com voos seguindo uma altura constante e linha média da topografia.

Já os filtros devem ser aplicados para remover algumas interferências geológica nas leituras, tentando maximizar a separação do sinal produzido pelas fontes de interesse do levantamento, dos produzidos de fontes indesejáveis a fim de ressaltar características mais importantes e evidentes (Luiz & Silva 1995). A partir do campo anômalo realiza-se a filtragem das derivadas horizontais nas direções X, Y, e verticais e Z (Telford 1990), a fim de evidenciar estruturas N-S e E-W. Outra forma de tratamento e apresentação dos dados é com o mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA), que transforma os dados de campo de dipolar para monopolar. Essa filtragem é essencial na análise dos dados magnetométricos, pois permite determinar limites geológicos e estruturais e a profundidade e topo de corpos geológicos (Thompson 1982), e apresenta o dado geofísico independente do campo magnético da Terra e da direção de magnetização da fonte (Roest *et al.* 1992), assim possibilita localizar mais precisamente a posição das anomalias e evidencia a existência de uma magnetização remanescente (Kearey *et al.* 2009). Outros filtros podem ser aplicados para remoção de ruídos, como diferenças de frequência e amplitude das respostas das fontes, explicitado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Filtros de Fourier e finalidades geofísica. (Barbosa & Oliveira *no prelo*)

	Filtros	Finalidade Geofísica
Derivadas	Gradiente vertical (1ª derivada)	Evidencia estruturas superficiais.
	Gradiente residual (2ª derivada)	Remove anomalias regionais e realça anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia estruturas N-S.
	Gradiente vertical em Y	Destaca estruturas E-W.
	Amplitude do sinal analítico	Projeção em superfície das anomalias em profundidade.
	Tilt Derivativo	Derivada do ângulo de inclinação da anomalia. Fornece uma estimativa do local de origem dos dados magnéticos.
Continuação	Para cima	Retira anomalias superficiais.
	Para baixo	Retira anomalias mais profundas (instável)
Frequência	Passa banda	Determina intervalo de frequência.
	Passa alta	Retira dados de baixa frequência, obtendo informações mais superficiais.
	Passa baixa	Retira dados de alta frequência, obtendo informações mais profundas.

Outro filtro interessante a ser explorado é o de inclinação do sinal analítico ou TILT (TDR), que evidencia a relação da primeira derivada vertical (VDR) com os gradientes verticais (THDR) (Equação 3.12), o que destaca anomalias de grandes e pequenas amplitude (Miller & Singh 1994). Esse filtro TILT é usado para evidenciar a localização de anomalias, pois posiciona os valores máximos da anomalia sobre o centro do corpo, caindo para zero sobre as proximidades dos limites do corpo anômalo, logo, não pode ser usado para delimitação de bordas (Cooper & Cowan 2008).

$$TDR = \tan^{-1} \frac{VDR}{THDR}$$

Equação 3.12

As respostas desse filtro em dados magnetométricos reduzidos ao polo possuem seus picos exatamente sobre o centro do corpo, caindo para zero sobre as proximidades dos limites do corpo anômalo. Por esse motivo, o filtro de inclinação do sinal analítico não pode ser considerado um método de detecção de bordas, porém é considerado um método de destaque de anomalias.

3.4 DECONVOLUÇÃO DE EULER

A deconvolução de Euler é uma técnica de mapeamento espacial das fontes anômalas de campos potenciais, baseada na equação de homogeneidade de Euler. Essa técnica é usada como ferramenta quantitativa de interpretação para estimar a posição horizontal e profundidades de fontes magnéticas e gravimétricas, estimando a magnetização e volume da fonte geradora (Reid *et al.* 1990, Barbosa & Silva 2005).

Essa metodologia foi introduzida por Thompson (1982), cuja equação homogênea de Euler ele correlacionou à distribuição de densidade e às heterogeneidades de susceptibilidade magnética das fontes geradoras com sua geometria em profundidade. As soluções desse método são estimadas para grupos de índices estruturais, que expressam a relação de homogeneidade da equação. Os índices aliados às posições estimadas, podem identificar e caracterizar uma grande variedade de estruturas geológicas, como contatos, foliações, falhas, diques, soleiras, *pipes*, intrusões e outras feições que possam apresentar resposta magnética (Thompson 1982, Reid *et al.* 1990).

Para a estimativa da localização e da geometria das fontes anômalas, não é necessário presumir a direção do vetor magnetização (Barbosa & Silva 2005), assim o método utiliza as amplitudes do sinal analítico para conhecer as coordenadas horizontais (x_0 e y_0) e coordenada vertical (z_0), que representam a posição da fonte magnética, e com elas, estima-se a profundidade da fonte através de máxima amplitude (Salem & Ravat 2003).

A Equação 3.13 constitui das coordenadas no sistema cartesiano do centro do corpo alvo, x_0 , y_0 e z_0 , a anomalia de campo magnético potencial T e o índice de homogeneização (η), isso indica a medida da taxa de decaimento da intensidade do campo em função da distância da fonte e do ponto e referência. Esse parâmetro η varia com o grau de complexidade da fonte geradora, o qual indica a forma geométrica da anomalia recebendo o nome de índice estrutural.

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

Equação 3.13

A tabela 3.3 correlaciona os índices estruturais com os principais modelos físicos de estruturas geológicas associadas. Presume-se o conhecimento prévio do índice estrutural (Tabela 3.3) para a anomalia em análise, proposta por Thompson (1982).

Tabela 3.3 - Tabela de índice estrutural aplicado à equação de Euler (Modificado de Kearey *et al.* 2009)

Fonte	Índice estrutural
Esfera	3,0
Cilindro horizontal ou vertical	2,0
Dique	1,5
Contato	1,0

A partir da equação anterior, é possível observar que o índice estrutural é o único parâmetro desconhecido. Sendo assim, o método é aplicado, consecutivamente, para as diferentes medidas, a fim de fornecer uma estimativa única de localização de fonte. Estas localizações, por fim, são plotadas em um *cross section* apresentando conjuntos de soluções em torno das magnetizações de interesse.

3.5 RADIOMETRIA

O método gamaespectrométrico ou radiometria consiste em detectar as emissões nucleares das rochas que contêm minerais radioativos. Segundo Kearey *et al.* (2009), os principais radioelementos que influenciam a radioatividade natural das rochas são o urânio (U), o tório (Th) e o potássio (K). Tais

elementos são litófilos e apresentam concentrações relativamente maiores nas rochas ígneas ácidas, em comparação com intermediárias, básicas e ultrabásicas (Figura 3.5).

Esse método é bastante empregado no mapeamento geológico, o que ajuda na identificação e classificação das litologias pelo conteúdo radioativo. Esse método não tem resposta para grandes profundidades, utilizado em interpretações mais rasas.

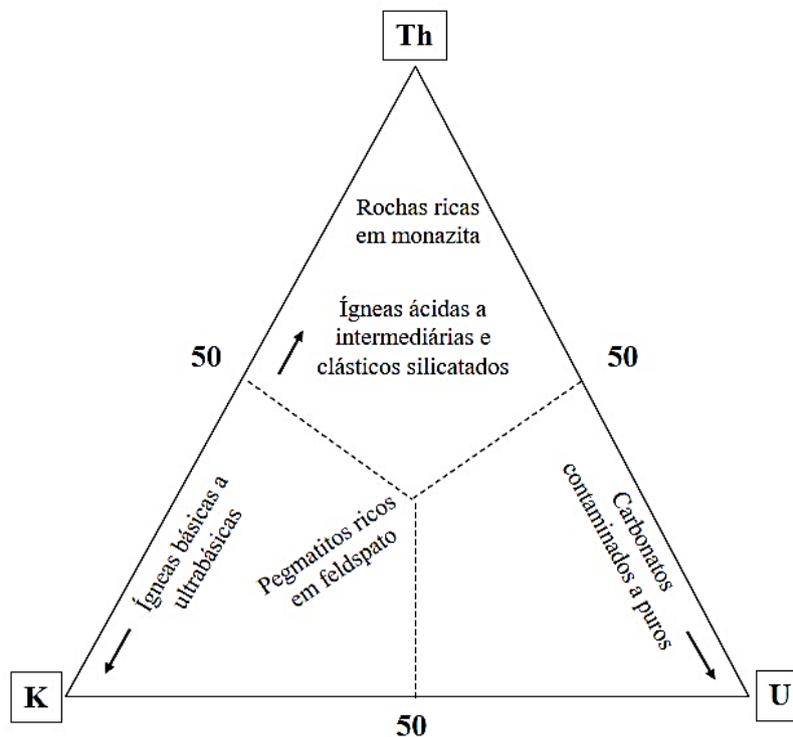


Figura 3.5 - Abundância dos elementos radioativos nos diferentes tipos e composição de rochas. (Modificado de Kearey *et al.* 2009)

3.5.1 Radioatividade

A radioatividade é originada da desintegração espontânea de elementos químicos com emissão de partículas alfa (α), partículas beta (β) e os raios gama (γ). O núcleo dos elementos fica no estado excitado e libera radiação gama no decaimento do elemento, que passa para um nível de energia mais estável e, conseqüentemente, mais baixa.

Os levantamentos radiométricos são baseados na quantificação de radioatividade emitida pelos minerais, devido ao decaimento radioativo de seus elementos. Nesse procedimento, apenas as partículas beta e gama são utilizadas por conta de seus maiores potenciais de energia. Partículas beta consistem em elétrons possivelmente liberados quando há divisão de um nêutron em um próton e um elétron, permanecendo no centro a partícula positiva e aumentando o número atômico, formando um novo elemento. Os raios gama são radiações eletromagnéticas liberadas durante processos de decaimento e

desintegração radioativa, e somente essas partículas podem ser detectadas no levantamento aerotransportado. Essa radiação da partícula gama é importante para o método, pois identifica a radiação e propriedades dos materiais submetidos.

3.5.2 Levantamento radiométrico

A radiometria é utilizada para corpos subaflorantes devido à sua baixa penetrabilidade. O levantamento radiométrico, em sua maioria, é realizado aerotransportado, em conjunto com leituras magnéticas, a fim de trazer conjunto de dados adicionais a um custo mínimo. A altitude de voo, em geral, é mais baixa, pois as emissões radioativas têm menor poder de penetração das emissões radioativas e os dados adquiridos são de natureza qualitativa (Kearey *et al.* 2009).

Os equipamentos utilizados na quantificação de radiação em subsuperfície são o contador Geiger, cintilômetros, espectrômetros de raios gama e medidores de emanações de radônio. Uma extensão de cintilômetros conhecida como espectrômetro de raios gamas, é utilizada no método da radiometria para identificação da origem da radiação dos elementos K, U e Th. Assim, os levantamentos radiométricos são úteis no mapeamento geológico, pois diferentes tipos de rochas podem ser reconhecidos por sua assinatura radioativa dos elementos litófilos (Kearey *et al.* 2009).

3.5.3 Dados radiométricos

Esse método é amplamente aplicado no mapeamento e prospecção geológica, pois as concentrações distintas dos elementos nos minerais geram contrastes marcantes, possibilitando a interpretação de contatos geológicos impossíveis de mapeados em campo, encoberto por solo ou vegetação e de zonas hidrotermalizadas são facilmente identificadas em mapas a partir desse método, pois nessas zonas há remobilização do U, em maior teor que seu isótopo, o Th. Além disso, possibilita o estudo de grandes áreas em menor tempo.

Os dados radiométricos são processados com a confecção de mapas temáticos. Neles é possível identificar a presença de anomalias, nas quais são identificados e interpretados os teores dos elementos medidos. Musset & Khan (2001) resumem os mapas gerados a partir dos dados radiométricos e suas utilidades na identificação de rochas em subsuperfície. Sendo o canal de Potássio (K) com boa resposta na identificação de rochas compostas por uma grande quantidade de álcali feldspatos e micas, como rochas sedimentares e granitoides, e na identificação de depósitos evaporíticos superficiais, como de carnalita e silvita. O canal de Tório (Th) geralmente se aplica na caracterização de áreas com intemperismo químico alto, e o de Urânio (U) é bastante mensurado no contexto de identificação de minerais acessórios como uraninita, inclusa em pegmatitos e granitoides ou em ambientes oxidantes.

Além desses, faz-se também a análise das razões Th/K, K/U, U/Th e o fator F ($K*U/Th$). Esses dados visam ressaltar a relação entre os elementos de uma mesma área e criar contrastes ou evidenciar anomalias. A razão Th/K auxilia na identificação de regiões com hidrotermalismo e anomalias potássicas relacionadas a contatos geológicos, já a razão U/Th pode auxiliar a correlacionar o tipo de ambiente deposicional de folhelhos negros carbonosos. Geralmente, a razão se concentra em ambientes marinhos e o tório em ambientes terrestres (Musset & Khan 2001).

4.1 INTRODUÇÃO

A análise qualitativa de dados geofísicos tem a intenção de apresentar resultados descritivos, envolvendo a caracterização 2D de padrões, texturas e cor dos mapas geofísicos, essenciais para o esboço de regiões similares, classificando-as em fácies, a fim de se estabelecer uma correlação com o contexto geológico (Dentith & Mudge 2014). Além disso, os lineamentos geofísicos também propõem essa relação com os dados estruturais da área de estudo.

Portanto, este capítulo dedica-se à análise geofísica qualitativa e morfoestrutural, com a apresentação e descrição dos mapas temáticos, resultado do tratamento dos dados geofísicos e avaliação dos lineamentos magnetométricos e radiométricos.

4.2 BANCO DE DADOS GEOFÍSICOS

A base de dados utilizado neste trabalho advém de duas fontes. Os dados de gravimetria são provenientes do Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG) e os de magnetometria e radiometria são procedentes do Programa de levantamento aéreo do Projeto Rio das Velhas.

O BNDG (Banco Nacional de Dados Gravimétricos) é um banco de dados de levantamentos gravimétricos terrestres realizados no Brasil, que tem a função de reunir as informações e disponibilizá-las gratuitamente. A ANP (Agência Nacional do Petróleo), que é responsável por receber e organizar os dados das instituições de pesquisa, gerenciado pelo BDEP (Banco de Dados de Exploração e Produção da ANP). Dentre as instituições fornecedoras dos dados estão a Petrobras, CPRM, ON, UFF, IAG/USP, Poli/USP, UNB, IBGE, UGPR, UFBA, Unesp, Uerj e UFRN (Figura 4.1).

Os dados que foram utilizados para este trabalho são do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, cuja instituição detém de cerca de 10.047 estações gravimétricas espalhadas pelo país, desenvolvidas e instaladas como parte de diversos projetos da Diretoria de Geologia e Recursos Minerais (DGM / CPRM), realizados ao longo de 4 anos (2012 a 2016) (CPRM 2017).

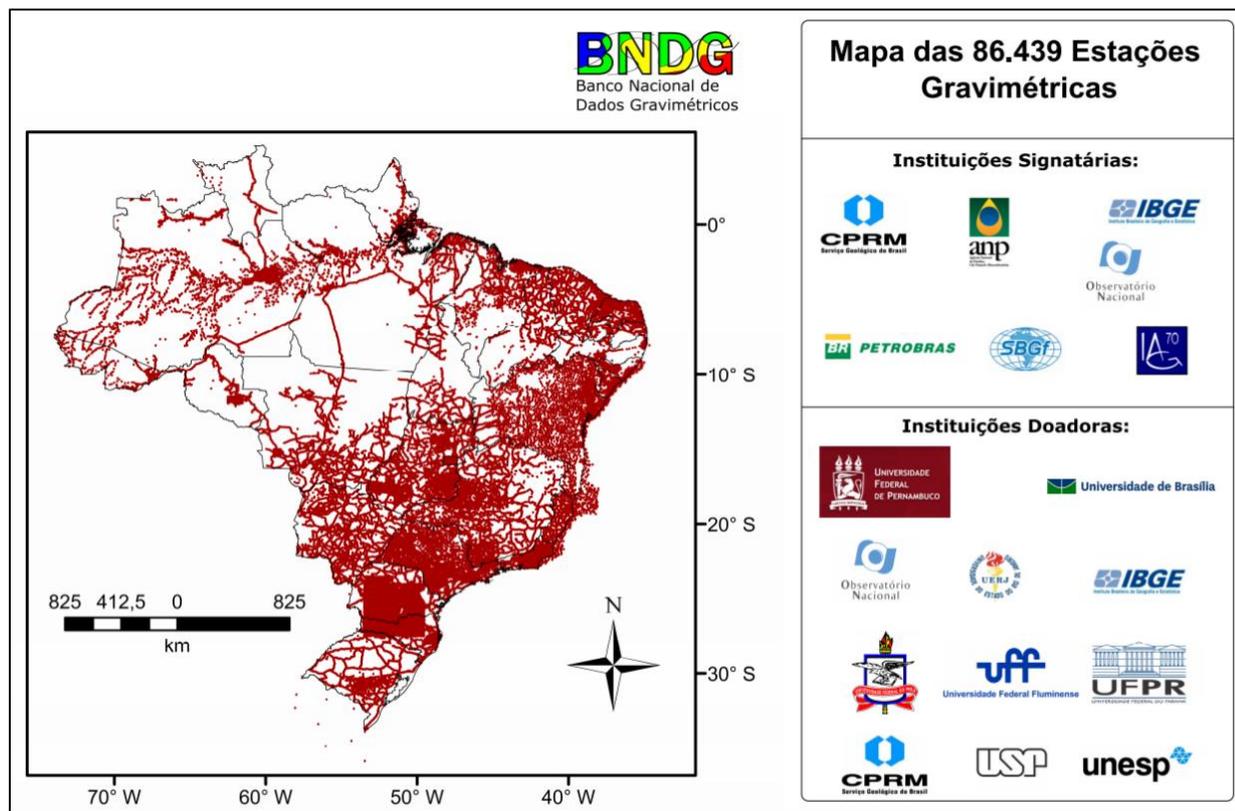


Figura 4.1 - Mapa da distribuição de estações gravimétricas ao longo do território brasileiro (BNDG 2018).

Os dados foram solicitados ao BNDG, por meio de um formulário disponibilizados em plataforma online da ANP, sendo requeridas as informações que abrange a área do Quadrilátero Ferrífero, onde se localiza a área deste estudo. A área que foi delimitada para a análise gravimétrica foi além do limite da área de estudo, apresentada na Figura 4.2 com a localização das estações gravimétricas utilizadas para este trabalho.

No geral, essas estações possuem espaçamento médio de 1 a 2 km entre elas, com uso de gravímetro de modelo CG-5. A altitude e as coordenadas geográficas foram obtidas por um GPS diferencial, cuja precisão é de 0,5m no cálculo da altitude (CPRM 2017).

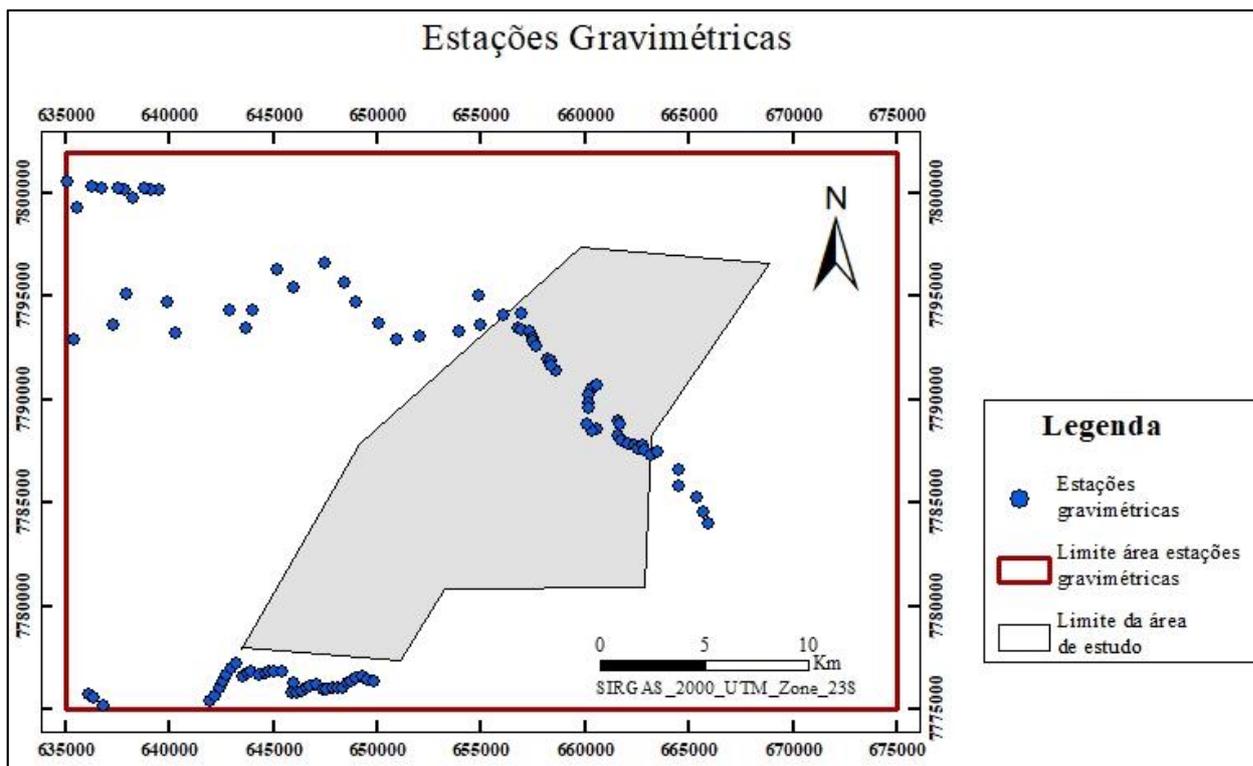


Figura 4.2 - Mapa de localização das estações gravimétricas para área expandida do limite da área de estudo (BNDG 2018).

O Projeto Rio das Velhas consiste no Programa de Levantamento Aerogeofísico realizado em 1992 pelo convênio DNPM/Consórcio de empresas de mineração e o Mapeamento Geológico do *Greenstone belt* Rio das Velhas (DNPM/CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1994/1996). Continua até hoje sendo o levantamento aerogeofísico mais abrangente já realizado no Brasil, quanto ao nível de aquisição de dados e compilação deles em termos de mapas. Os dados adquiridos foram de aeromagnetometria, radiométricos e eletromagnético realizado na região do Quadrilátero Ferrífero, recobrando uma área total de 1700 km².

A área de abrangência foi determinada geologicamente, onde ocorrem rochas pertencentes aos Grupos Nova Lima e Maquiné, assim esse levantamento teve como objetivo realizar a obtenção de geofísica de detalhe, a fim de atualizar e complementar a base geológica da região visando a caracterização geológico-geofísica do *greenstone*, e ação de novos alvos para prospecção mineral na região do Quadrilátero Ferrífero.

Por haver divergências, principalmente estruturais, o levantamento foi subdividido em blocos, (Blocos I, II, III e IV) (Figura 4.3), cujas características estão descritas no Quadro 4.1.

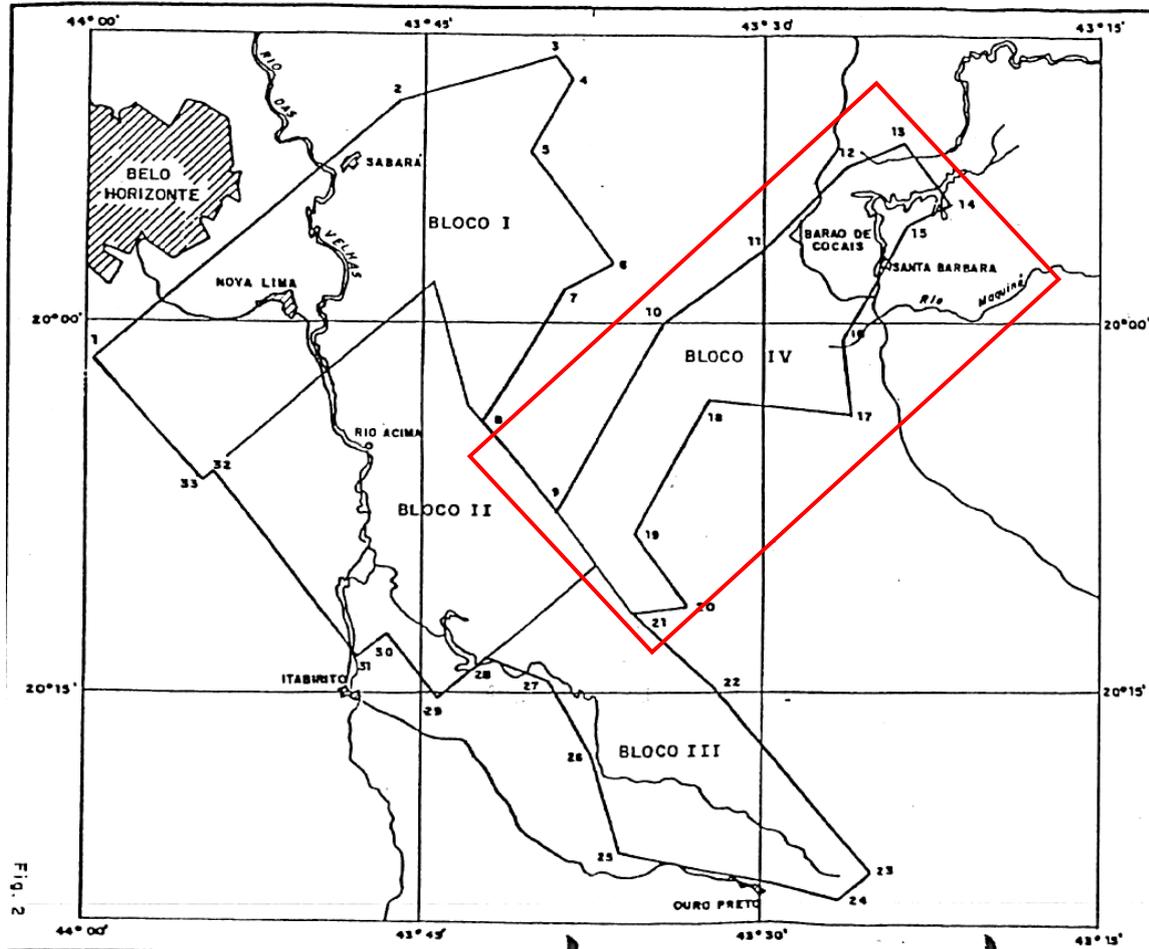


Figura 4.3 - Divisão de blocos do levantamento aerogeofísico. A área destacada em vermelho corresponde ao bloco onde se localiza a área deste estudo (Modificado de Hildenbrand *et al.* 1992).

O Bloco IV é o bloco designado Bloco Santa Bárbara, que abrange a região de interesse deste trabalho, o Lineamento Córrego do Sítio. Neste bloco o levantamento teve orientação preferencial N40W das linhas de medida e N50E, as linhas de controle. O espaçamento foi o mesmo em todos os blocos, 250m da linha de medida e 5000m as linhas de controle. As alturas dos sensores foram variadas, sendo o gamaespectrômetro a 60m e uma leitura/segundo de 25 em 25m. O magnetômetro foi posicionado a 45m de altitude em média, e o eletromagnetômetro a 30m, com leituras de 5 em 5m e 5 leituras por segundo.

Quadro 4.1 - Quadro de informações técnicas do levantamento aerogeofísico do Projeto Rio das Velhas, para os métodos de magnetometria e radiometria (Hildenbrand *et al.* 1992).

Projeto		Localização	Área (km ²)	Velocidade voo (km/h)	Altura de voo (m)	Datum	
Rio das Velhas (1992)	Bloco 1	Nova Lima - Caeté	1.700	70 a 110	80	SAD 69	
	Bloco 2	Santa Bárbara - Barão de Cocais					
	Bloco 3	Nova Lima - Caeté					
	Bloco 4	Santa Bárbara - Barão de Cocais					
Linhas de produção		Linhas de controle		Amostragem			
Espaçamento (m)	Direção	Espaçamento (m)	Direção	Magnetometria		Radiometria	
				(s)	(m)	(s)	(m)
250	N60W	5.000	N30E	0	2 a 3	1	20 a 30
	N30E		N60W				
	N60W		N30E				
	N30E		N60W				

4.3 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA

A análise gravimétrica neste trabalho decorre de uma base de dados de levantamentos gravimétricos terrestres e a elaboração dos mapas foi feita a partir da metodologia descrita em (1.3),

tratados com o processamento de filtros, a fim de destacar as anomalias. Os mapas gravimétricos foram gerados para uma área maior que a área de estudo, pois a quantidade de dados para a área de estudo exatamente não era suficiente. Para a elaboração dos mapas gravimétricos pelo método de mínima curvatura foi utilizado o tamanho da célula 15000, para extrapolação da anomalia e cobertura de toda a área. Assim, a partir dos dados, com suas devidas correções, foram gerados os grids de anomalia Bouguer e anomalia Free-air, e respectivamente, suas primeiras e segundas derivadas verticais (Dz) (Figura 4.4).

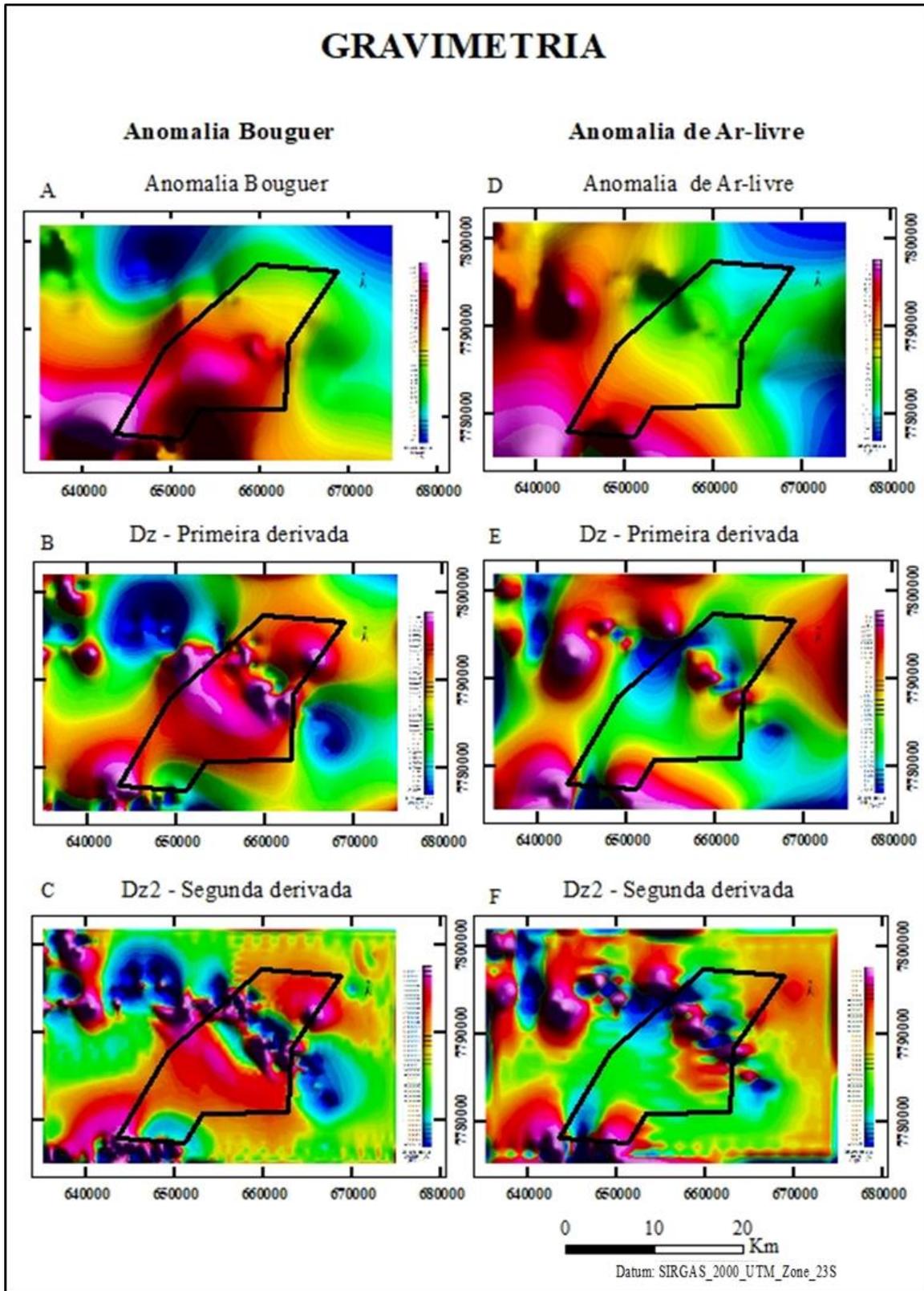


Figura 4.4 - Mapas geofísicos gerados a partir dos dados de gravimetria com o limite da área de estudo inserida na área total dos mapas. a) Mapa de anomalia Bouguer; b) Mapa de derivada vertical (dz) a partir da anomalia Bouguer; c) Mapa da segunda derivada vertical (dz2) a partir da anomalia Bouguer; d) Mapa de anomalia *Free-air*; e) Mapa de derivada vertical (dz) a partir da anomalia *Free-air*; f) Mapa da segunda derivada vertical (dz2) a partir da anomalia *Free-air*.

O processamento de derivadas verticais do campo gravimétrico foi escolhido a fim de realçar as respostas de contrastes de densidade litológico em profundidade. Para isso, os mapas de segundas derivadas são mais usados para interpretação, porque eles acentuam anomalias associadas a corpos rasos, de preferência às características daqueles mais profundos, que produzem pequenas alterações nos campos (Kearey *et al.* 2009).

A análise qualitativa foi realizada a partir do mapa de anomalia Bouguer, dividido em domínios de valores de anomalia de densidade baixa (A), intermediária (B) e alta (C) para orientar a integração geológico-geofísica (Figura 4.5).

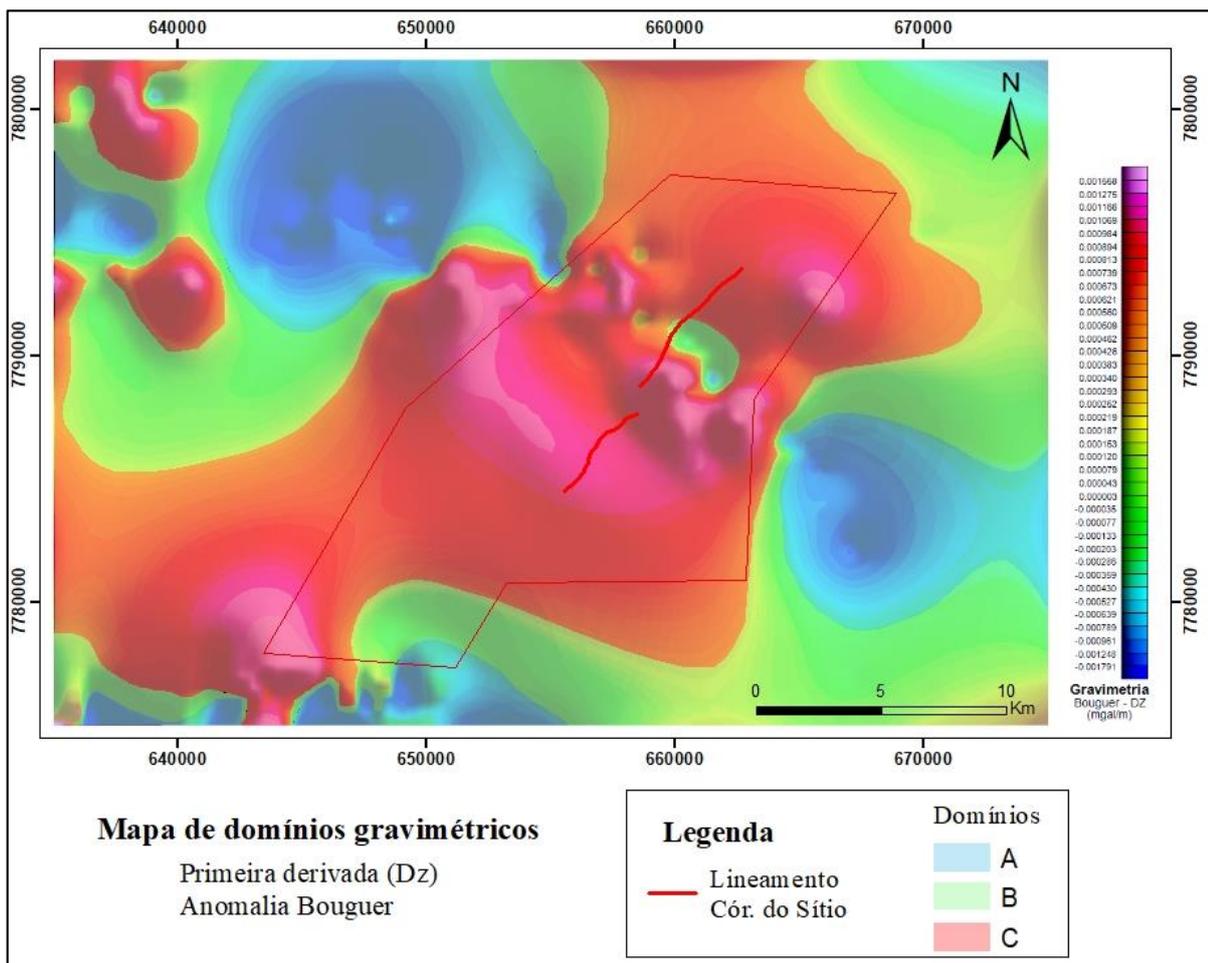


Figura 4.5 – Mapa de divisão em domínios gravimétricos de acordo com os intervalos de variação da densidade a partir do mapa de primeira derivada vertical da Anomalia Bouguer.

Os lineamentos gravimétricos foram traçados a partir do mapa Bouguer de segunda derivada. Foram traçados 174 lineamentos, o que resultou em uma direção principal N-S, de média 344,4°. Ademais, apresentou outras duas direções predominantes de lineamentos, que foram E-W e NW-SE (Figura 4.6).

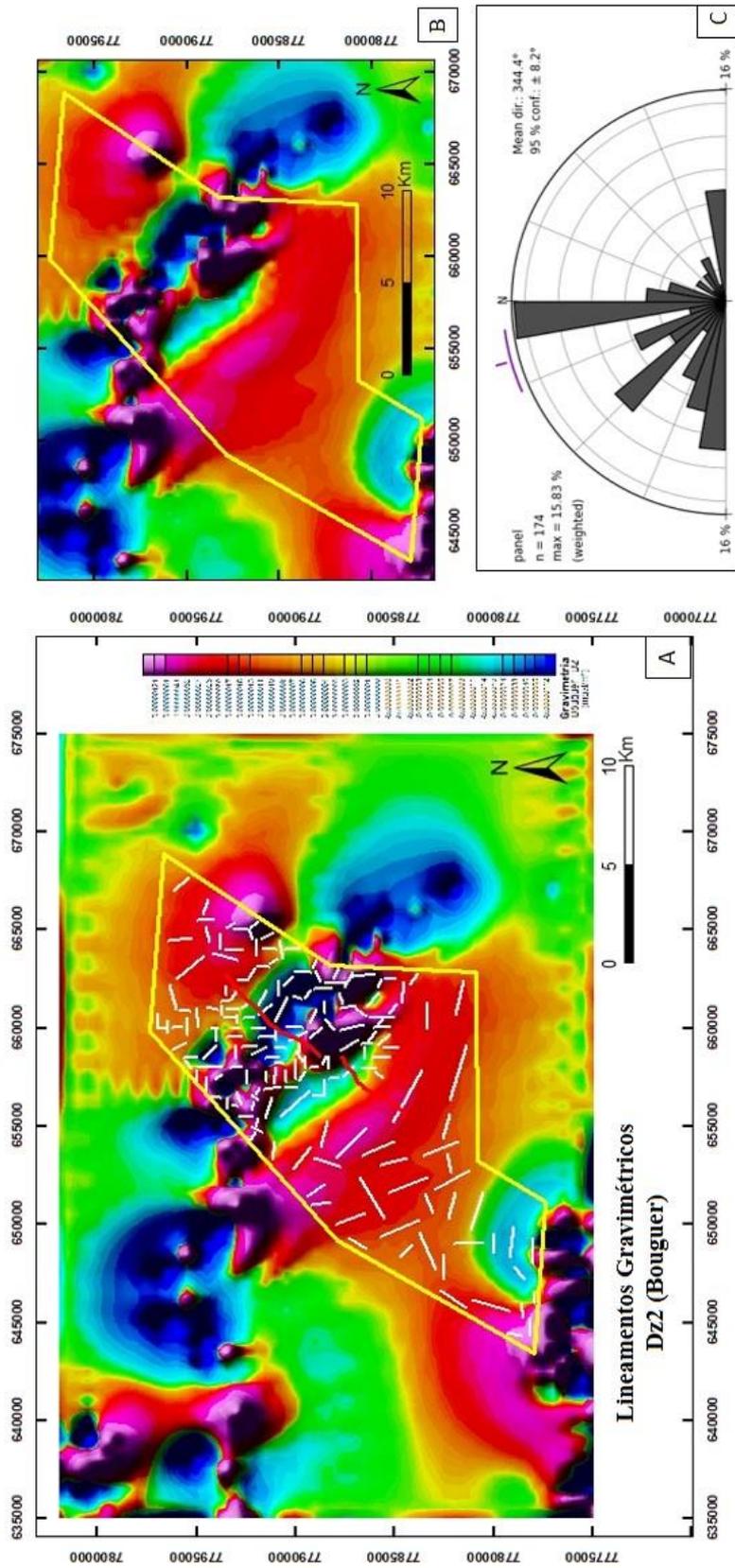


Figura 4.6 - A) Mapa de lineamentos gravimétricos a partir do mapa de segunda derivada da Anomalia Bouguer. B) Mapa de segunda derivada da anomalia Bouguer. C) Roseta de direções preferencias originada dos lineamentos traçados indicados no quadro anterior A.

4.4 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

O tratamento dos dados magnetométricos possibilitou a geração de mapas para que permitisse a visualização e a interpretação de estruturas da área de estudo, com a aplicação de filtros com o propósito de realçar, atenuar ou eliminar feições.

Primeiramente, foram gerados os *grids* e processados os mapas de campo anômalo (CA) e de amplitude do sinal analítico (ASA) pelo método de mínima curvatura utilizando um tamanho de célula de 250. Os demais mapas com aplicação de filtros foram produzidos a partir do *grid* de campo anômalo, com o processamento pela rotina *magma* e seus produtos foram as derivadas horizontais em x, y, destacando estruturas verticais e horizontais, a primeira e a segunda derivada vertical em z, que realça as anomalias mais profundas, e a inclinação do sinal analítico, TILT, que evidencia a localização do centro das anomalias (Figura 4.7).

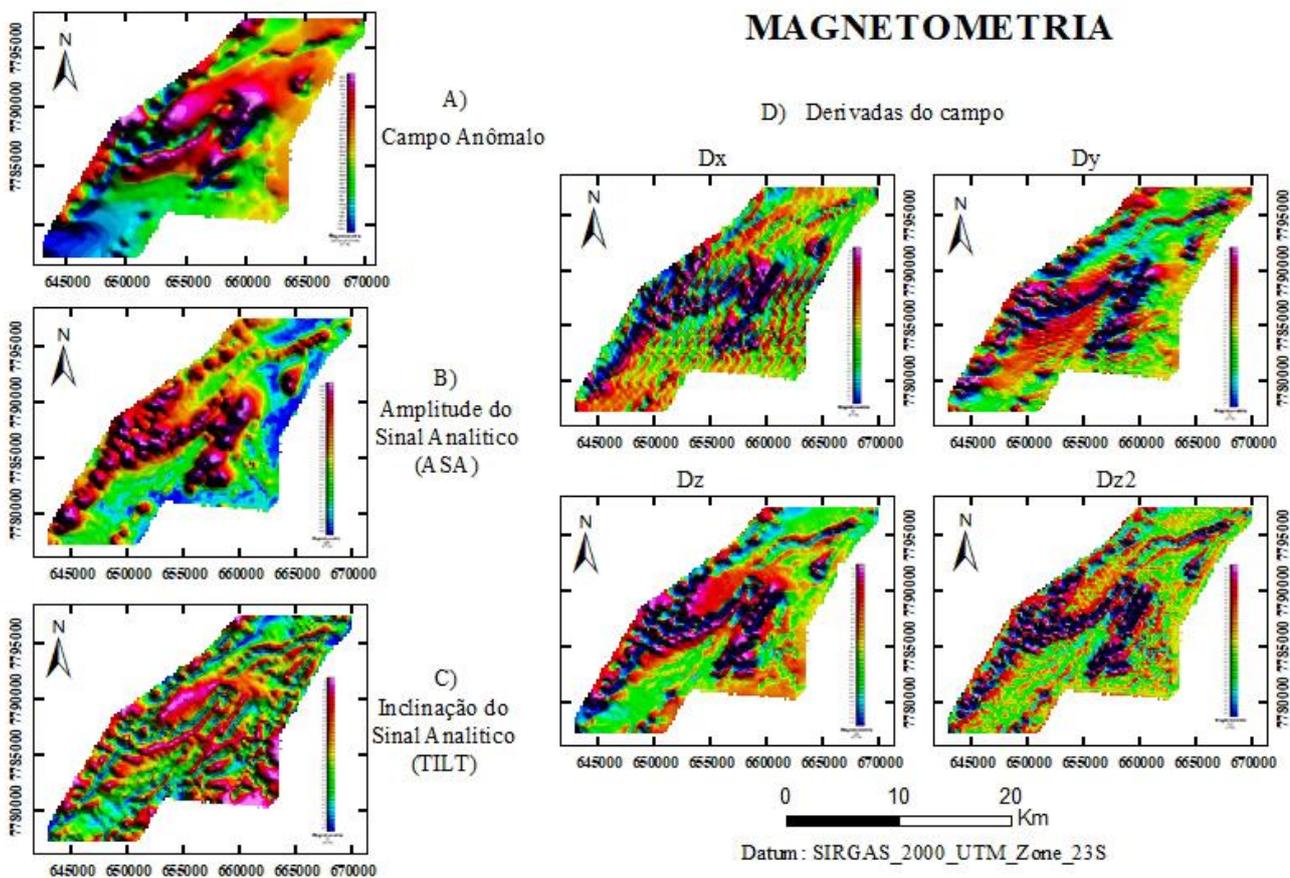


Figura 4.7 - Mapas magnetométricos. A) Mapa de Campo anômalo (CA); B) Mapas de Amplitude de sinal Analítico (ASA) e de Inclinação do sinal analítico (TILT); c) derivadas em x (Dx), y (Dy) e z (Dz) e segunda derivada de z (Dz₂).

O mapa ASA apresenta o dado monopolar, isso permite determinar limites geológicos e estruturais e a profundidade e o topo de corpos geológicos (Thompson 1982), e apresenta o dado geofísico independente do campo magnético da Terra e da direção de magnetização da fonte (Roest *et al.* 1992), portanto, é o meio mais eficiente para análise geométrica 2D. O mapa ASA exhibe as anomalias geofísicas projetadas em superfície, o que fornece informações das estruturas que se encontram em profundidade, permitindo o reconhecimento e a interpretação. Por esse motivo, a interpretação magnetométrica qualitativa da área fundamentou-se principalmente na análise do mapa de amplitude do sinal analítico. O estudo das anomalias foi realizado a partir da classificação em fácies magnéticas caracterizadas pelos valores de magnetização semelhantes, classificadas em três magnetofácies distintas.

As magnetofácies (Figura 4.8) foram divididas segundo a variação de amplitude e comprimento de onda, detalhada na Tabela 4.1. A magnetofácies 1 de baixa amplitude, correspondente às anomalias negativas, que compreende os tons de azul do mapa geofísico, com poucas ocorrências. A magnetofácies 2, de amplitude intermediária, classifica as respostas de valor intermediário, abrange as áreas de coloração verde a alaranjado do mapa geofísico, e ocorre na maior parte da área do mapa. A magnetofácies 3, de amplitudes mais altas, correspondente às anomalias positivas, compreendendo as porções de cores vermelha a magenta do mapa geofísico, e ocorre em maior concentração na porção central.

Tabela 4.1 - Classificação em magnetofácies do mapa de amplitude de sinal analítico (ASA).

Magnetofácies	Descrição
1	Anomalia negativa, com baixa amplitude e grandes comprimentos de onda. A resposta magnética compreende valores entre 0 e 0,14 nT/m.
2	Anomalia moderada, com valores de amplitude e comprimento de onda intermediários. A resposta magnética compreende valores entre 0,14 e 0,78 nT/m.
3	Anomalia positiva, com altas amplitudes e pequenos comprimentos de onda. A resposta magnética compreende valores acima de 0,78 nT/m.

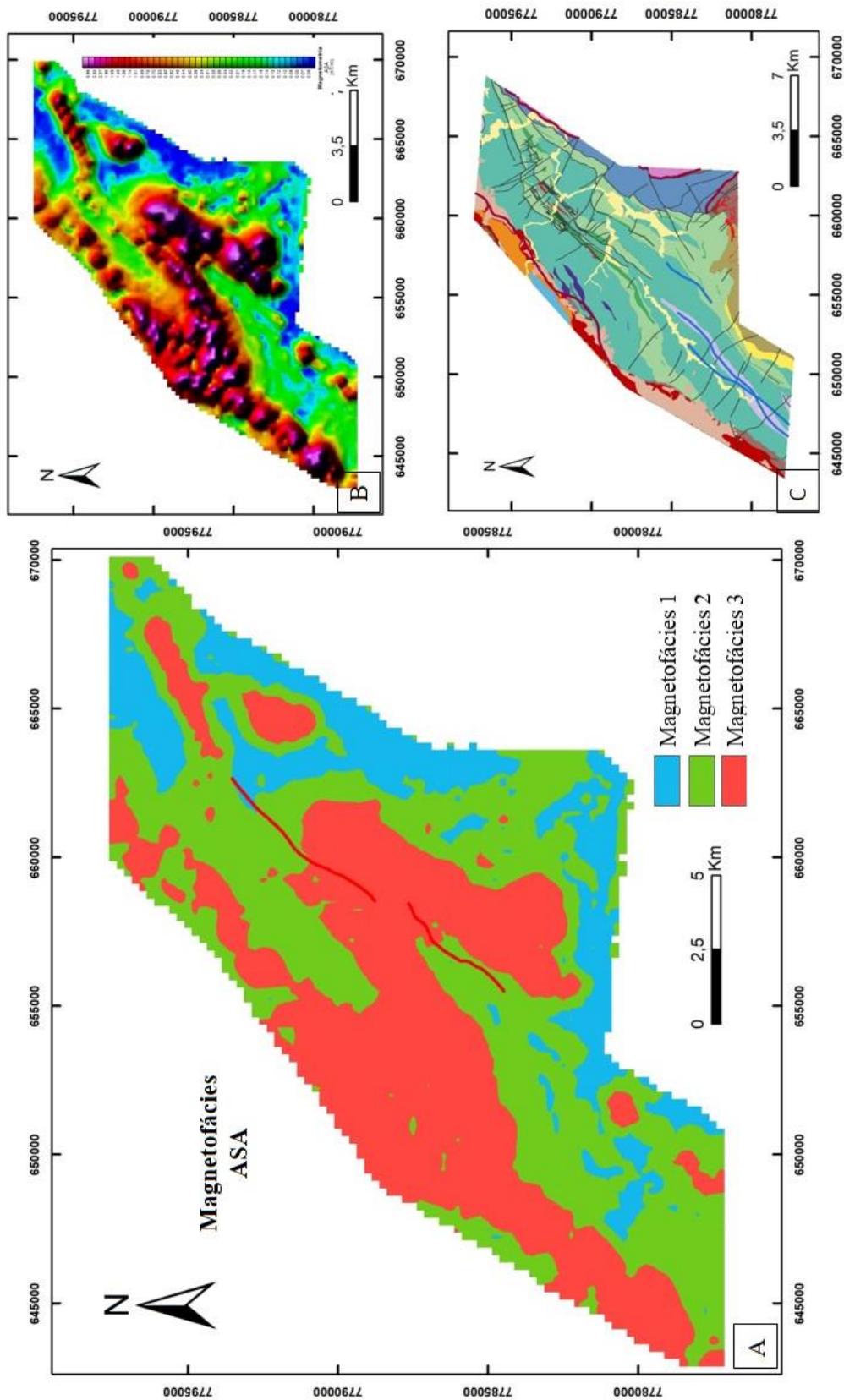


Figura 4.8 - A) Mapa de magnetofácies a partir do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA); B) Mapa de amplitude de sinal analítico; C) Mapa geológico da área de estudo.

Quanto aos lineamentos, foram analisados a disposição desses traços estruturais na área. No mapa ASA foram traçados 634 lineamentos relacionados às anomalias magnéticas, plotados no software OpenStereo, com a geração de uma roseta de direção preferencial 357,3°, aproximadamente N-S (Figura 4.9).

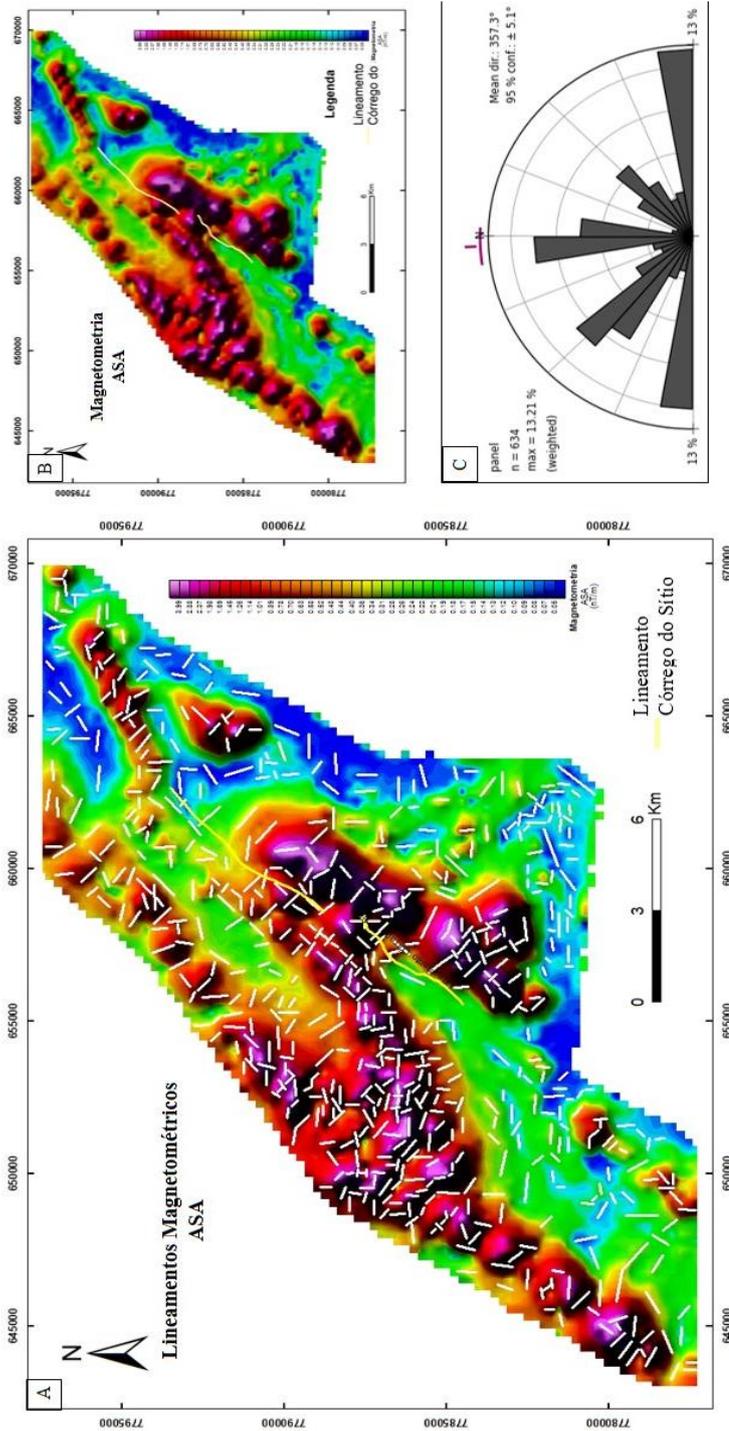


Figura 4.9 - A) Mapa de lineamentos geofísicos, a partir do mapa ASA (B), a esquerda e de lineamentos de relevo a direita, a partir da imagem SRTM, bem como suas respectivas rosetas (C) com direções principais dos lineamentos traçados.

4.5 ANÁLISE RADIOMÉTRICA

A radiometria se aplica na correspondência entre a litologia em superfície e diferentes concentrações dos elementos radioativos tório (Th), urânio (U) e potássio (K) nas rochas. Esse método possui baixo potencial de penetrabilidade gamaespectrométrica no solo e rochas, por isso, é bastante utilizado em trabalhos de mapeamento geológico.

A geração dos *grids* também foi feita pela interpolação dos dados pelo método de mínima curvatura, utilizando um tamanho de célula de 50. Os dados disponíveis são as informações de contagem total de elementos radioativos, contagem de tório, potássio e urânio, e as relações foram construídas pelas proporções de cada contagem. Assim, foram nove mapas gerados, somente de concentração de U, Th e K e das razões desses elementos, que são os mapas de imagem Ternária, Contagem Total, do Fator F, as razões U/Th, U/K e Th/K (Figura 4.10).

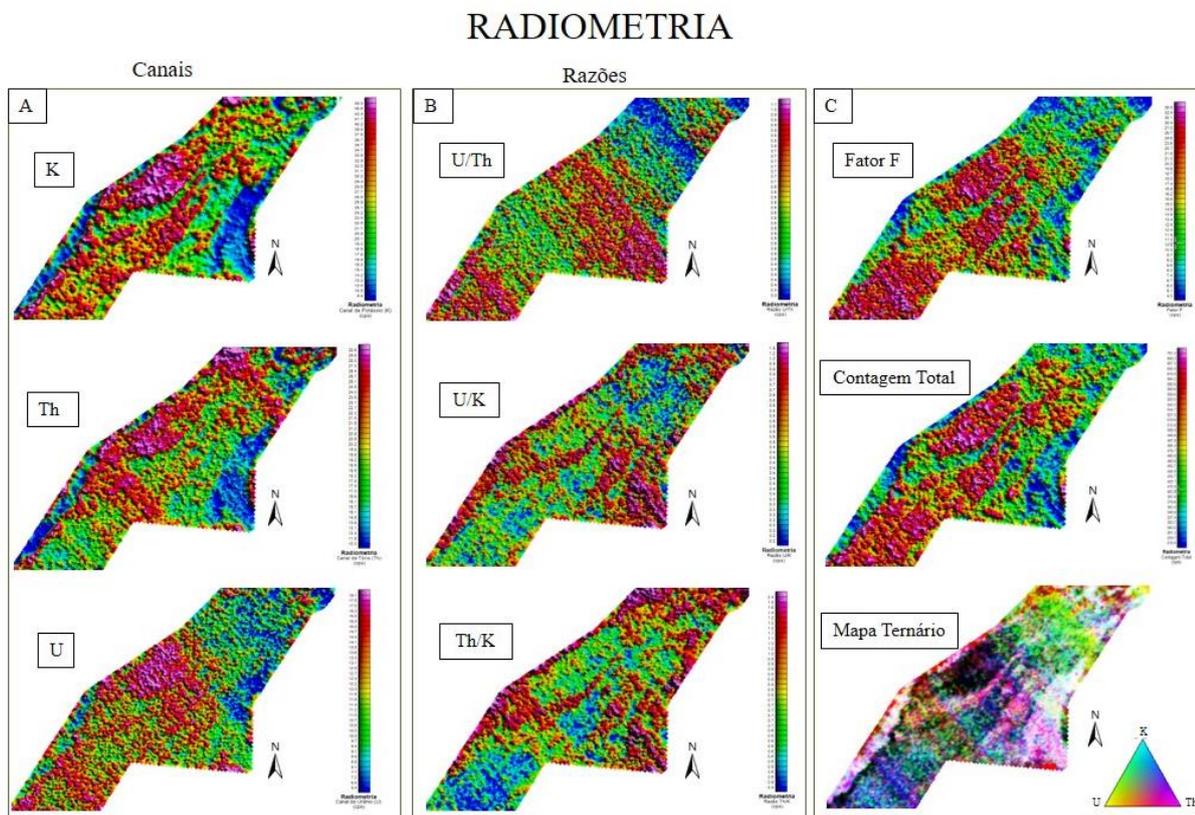


Figura 4.10 - Mapas radiométricos. A) Canais de potássio (K), tório (Th) e urânio (U); B) Mapas de Razões Th/K, U/K, U/Th. C) Mapas de Fator F, de Contagem Total e Ternário.

As radiofácies foram classificadas a partir mapa de imagem ternária (Figura 4.11) com a categorização de oito radiofácies diferentes em relação à variação das concentrações de K, U e Th descritas na Tabela 4.2.

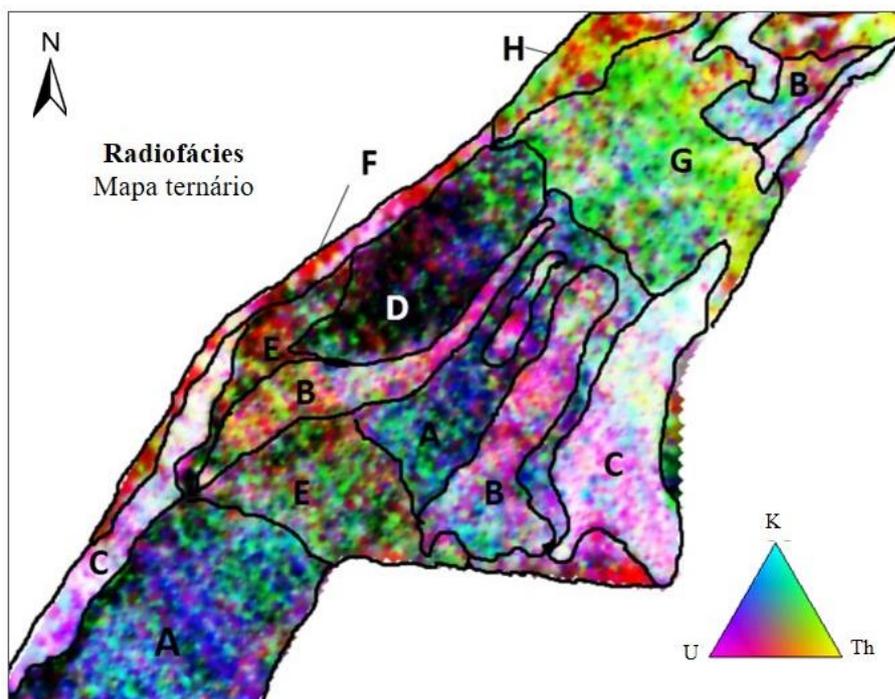


Figura 4.11 - Imagem ternária da área e sua subdivisão em regiões que delimitam as radiofácies.

Tabela 4.2 - Classificação das radiofácies delimitadas a partir do mapa radiométrico Ternário.

Radiofácies	Teor de Th	Teor de U	Teor de K
A	Muito baixo	Baixo a intermediário	Intermediário a alto
B	Baixo	Alto	Baixo
C	Alto	Alto	Alto
D	Baixo	Baixo	Baixo
E	Intermediário	Intermediário	Intermediário
F	Baixo	Alto a intermediário	Baixo
G	Intermediário a alto	Baixo	Baixo
H	Intermediário a alto	Baixo	Muito baixo

Quanto aos lineamentos radiométricos, foram analisados a disposição dos traços na área baseado no mapa de concentração de potássio, pois como a maioria das rochas que pertencem à região é de origem sedimentar, há uma melhor resposta radiométrica para análise de estruturas. Foram traçados 1250 lineamentos relacionados às anomalias radiométricas. Assim, resultou-se em uma resposta bastante heterogênea dos lineamentos, com grupo de lineamentos nas quatro direções: E-W, N-S, NE-SW e NW-SE. Como direção principal, tem-se 1,9°, aproximadamente N-S (Figura 4.12).

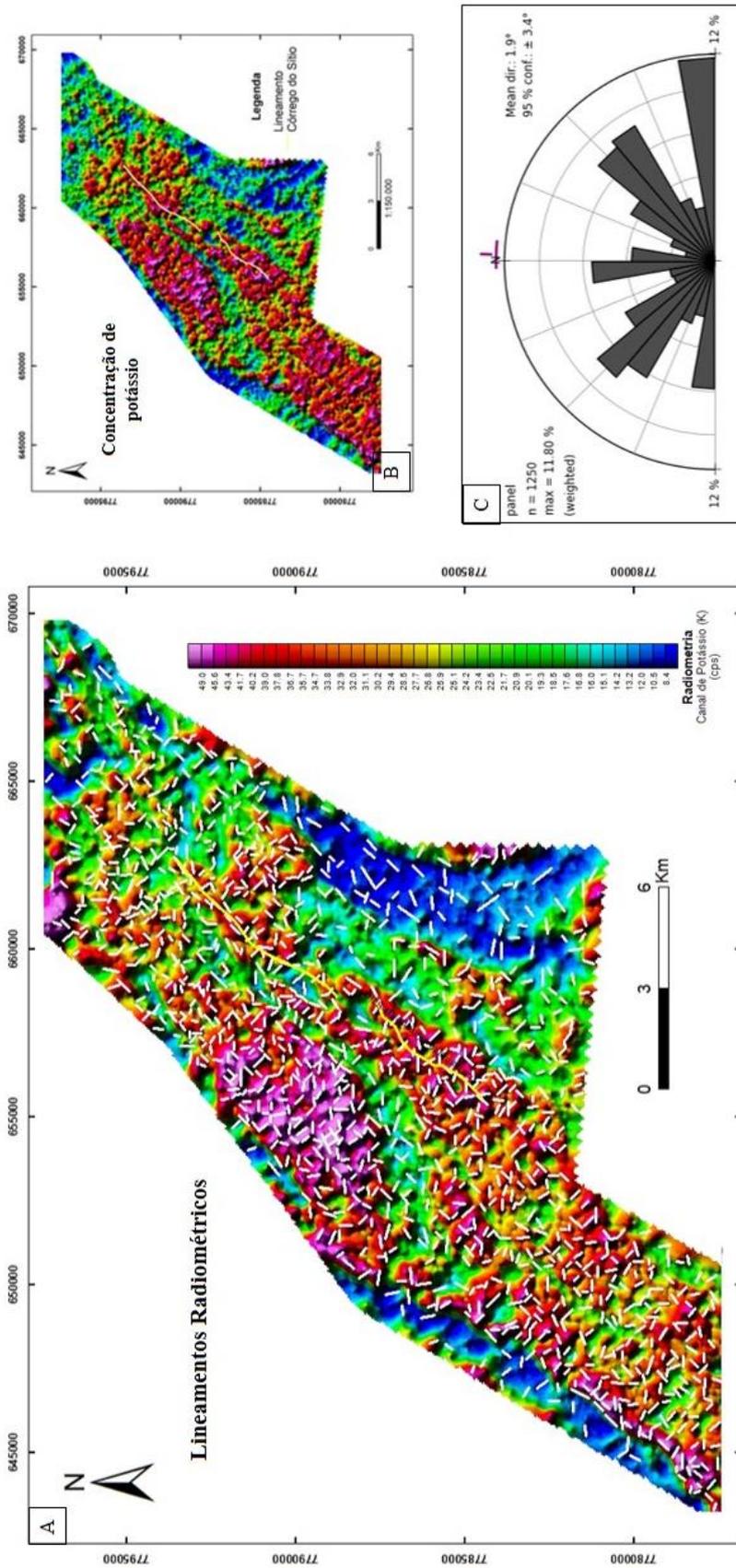


Figura 4.12 – A) Mapa de lineamentos radiométricos a partir do mapa de concentração de potássio. B) Mapa radiométrico de concentração de potássio. C) Roseta com direções principais dos lineamentos traçados.

4.6 ANÁLISE MORFOESTRUTURAL

Baseado no mapa morfoestrutural de relevo sombreado, elaborado a partir da imagem *Landsat*, foram traçados 308 lineamentos morfoestruturais (), que compreendem cristas e vales alinhados, além de drenagens, compondo a estrutura atual do relevo da área de estudo. O resultado da roseta gerada indica a direção preferencial dos lineamentos N-NW, com uma direção principal 340°.

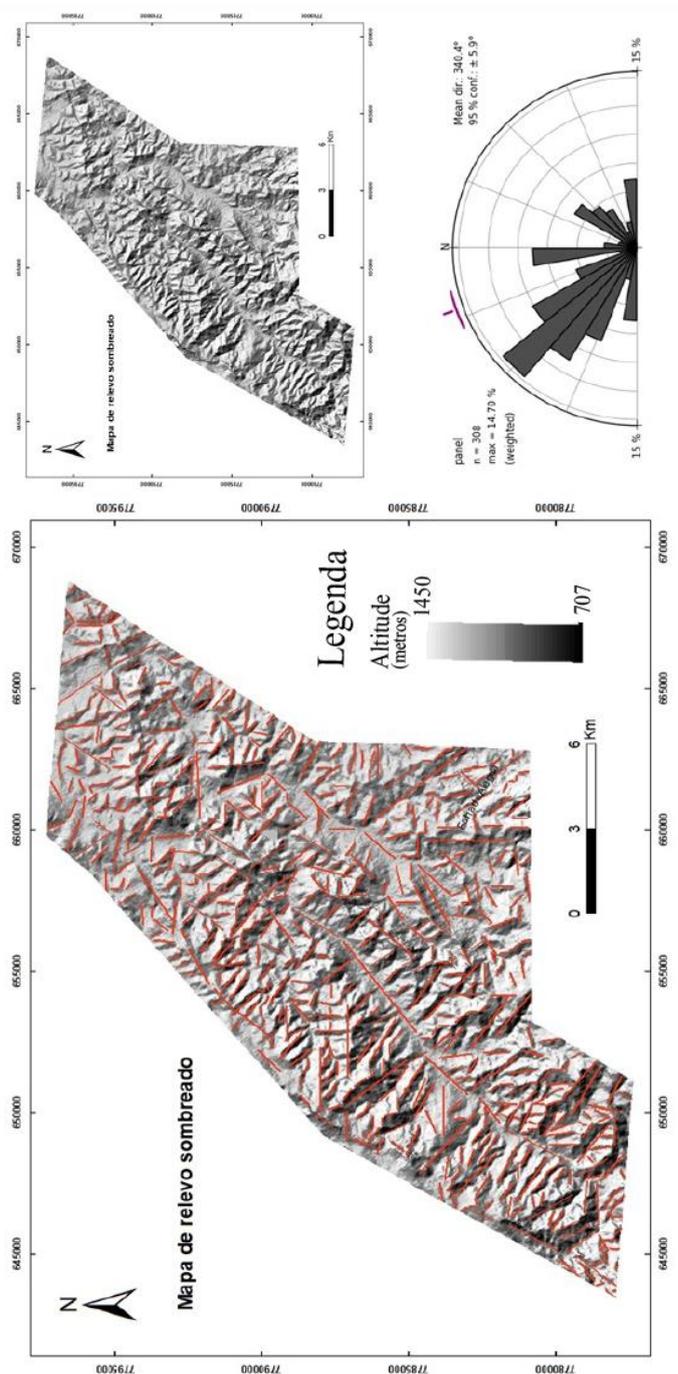


Figura 4.13 –A) Mapa de lineamentos morfoestruturais sobre de relevo sombreado. B) Mapa de relevo sombreado. C) Roseta com direções principais dos lineamentos traçados.

5.1 INTRODUÇÃO

A interpretação quantitativa se efetiva no cálculo das profundidades das fontes das anomalias magnéticas. A deconvolução de Euler permite essa análise com a visualização aproximada do posicionamento e profundidades médias das fontes de anomalias, bem como a sua geometria. Neste trabalho, a deconvolução foi realizada a partir dos dados magnéticos pelo mapa de amplitude do sinal analítico (ASA).

5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir do mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) foram traçados 30 perfis (Figura 5.1), de direção SE-NW aproximadamente perpendicular às estruturas, com 15km de comprimento e espaçamento de 1km entre eles.

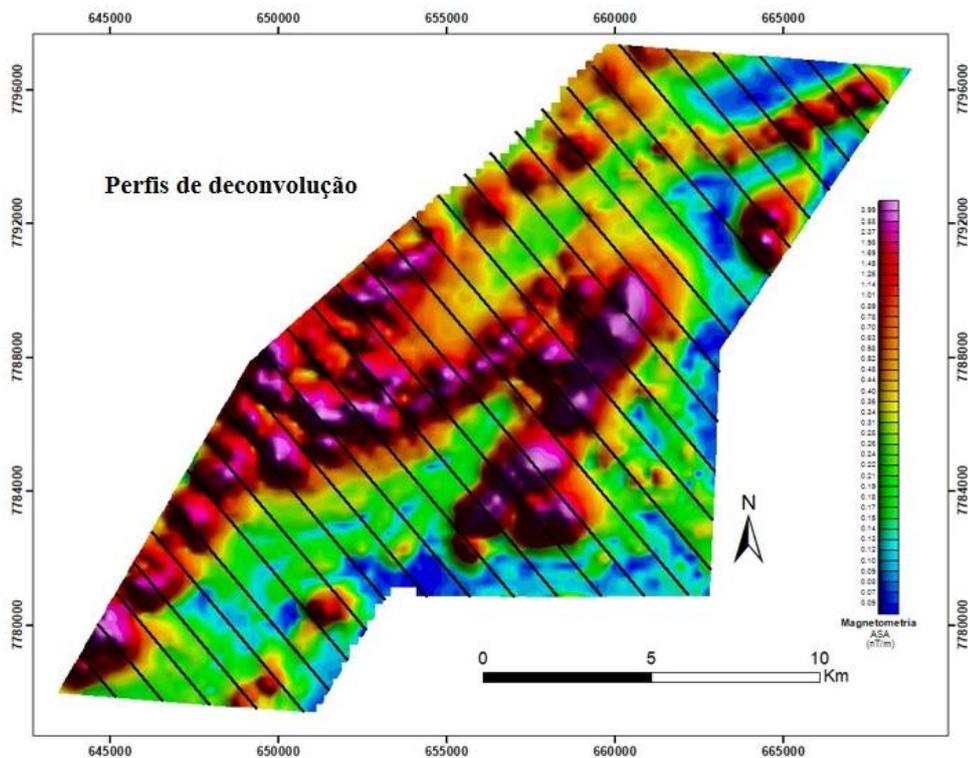


Figura 5.1 - Mapa de amplitude do sinal analítico com a localização dos perfis traçados para a deconvolução de Euler.

A aplicação da deconvolução foi realizada com o processamento dos 30 perfis traçados na área. No processo foi utilizado o índice estrutural 1.0, o tamanho da janela foi 19 para todos os perfis e as profundidades máximas foram ajustadas para cada perfil. Os valores mínimos e máximos de profundidade das anomalias e o comprimento dos perfis estão listados a seguir na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tabela com dados de comprimento do perfil e as respostas de profundidade mínima e máxima de cada um dos perfis pela deconvolução de Euler.

Perfil	Comprimento do perfil (m)	Prof. mín. de anomalias (m)	Prof. máx. de anomalias (m)
1	2800	15	390
2	4000	6	1130
3	5265	5	559
4	6660	7	929
5	7530	0	1173
6	7635	3	1350
7	7800	1	1336
8	8050	1	1199
9	8050	0	1084
10	8750	0	1522
11	10100	0	1721
12	11100	21	1209
13	11750	0	896
14	12650	3,6	1265
15	13400	1	1651
16	14150	0	1209
17	14100	0	5364
18	13750	0	2954
19	12200	0	756
20	10750	0	992
21	9700	4,5	2546
22	9400	0	1438
23	9450	7	1992
24	9250	1,5	1382
25	9000	6	1920
26	7800	0	1497
27	7150	0	2120
28	5250	0	402
29	4350	16	556
30	3400	0	417

O resultado da Deconvolução está apresentado na Figura 5.2, que apresenta os perfis com suas anomalias sobre o mapa ASA.

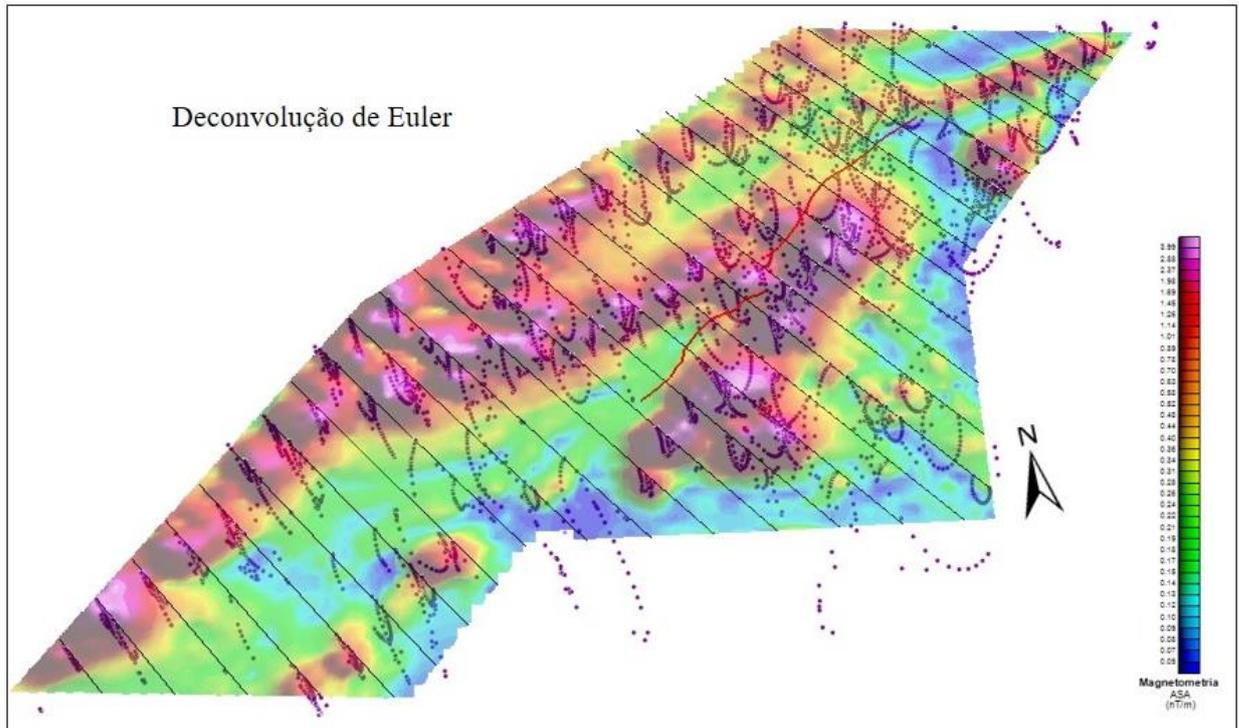


Figura 5.2 - Resultado da Deconvolução de Euler para cada perfil, visualizado sob o mapa ASA.

Dos perfis traçados na área, foram selecionadas duas linhas representativas para caracterização da área segundo o método de deconvolução de Euler. Ambos os perfis se localizam na porção central da área de estudo e interceptam o lineamento Córrego do Sítio. Estes são os perfis 17 e 21, plotados na Figura 5.3 e contemplam as porções com as maiores profundidades apontadas. O resultado do processamento de deconvolução estão apresentadas nos perfis nas Figura 5.4 e Figura 5.5.

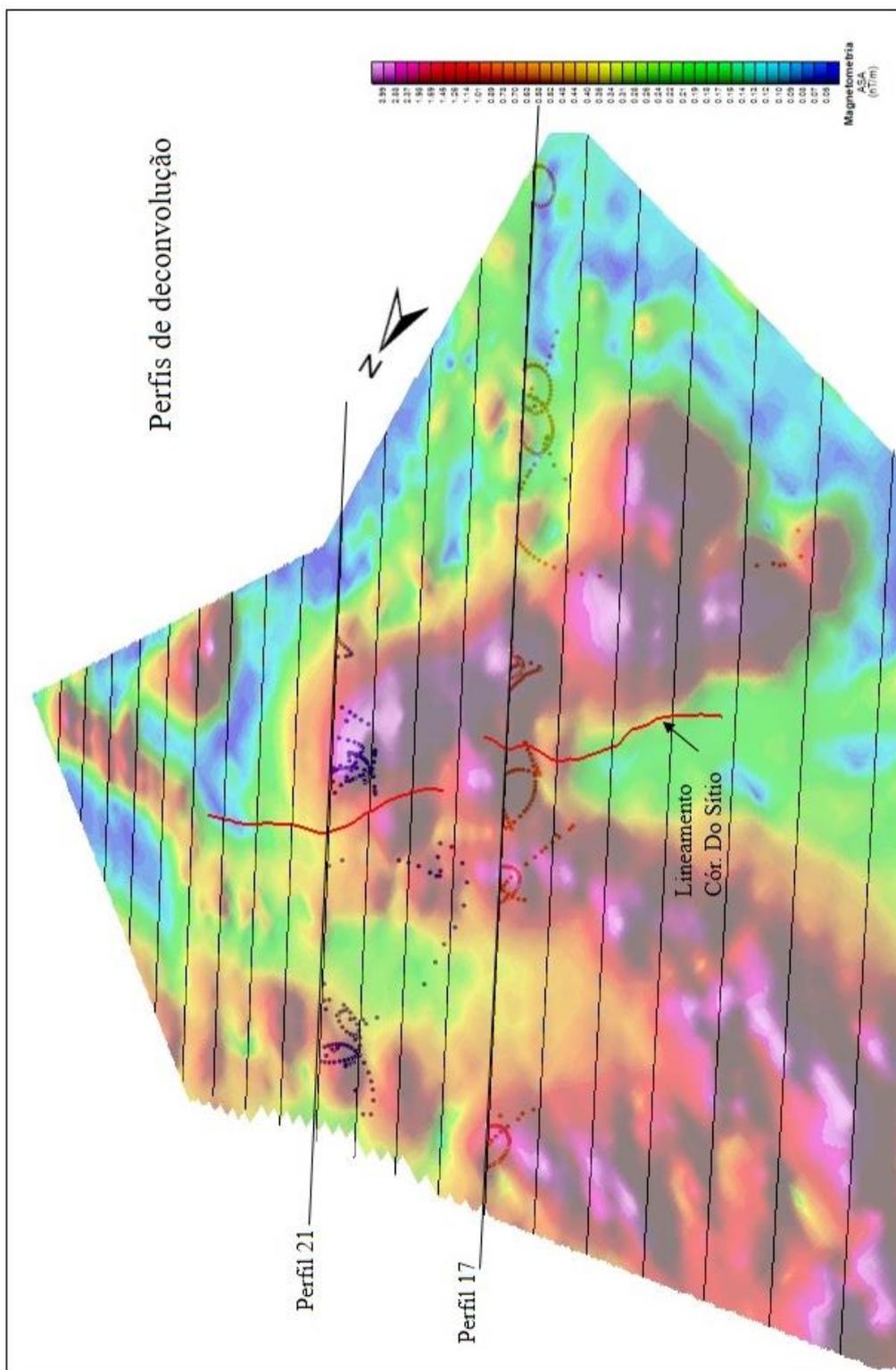


Figura 5.3 - Perfis de deconvolução e visualização 2D dos perfis 17 e 21.

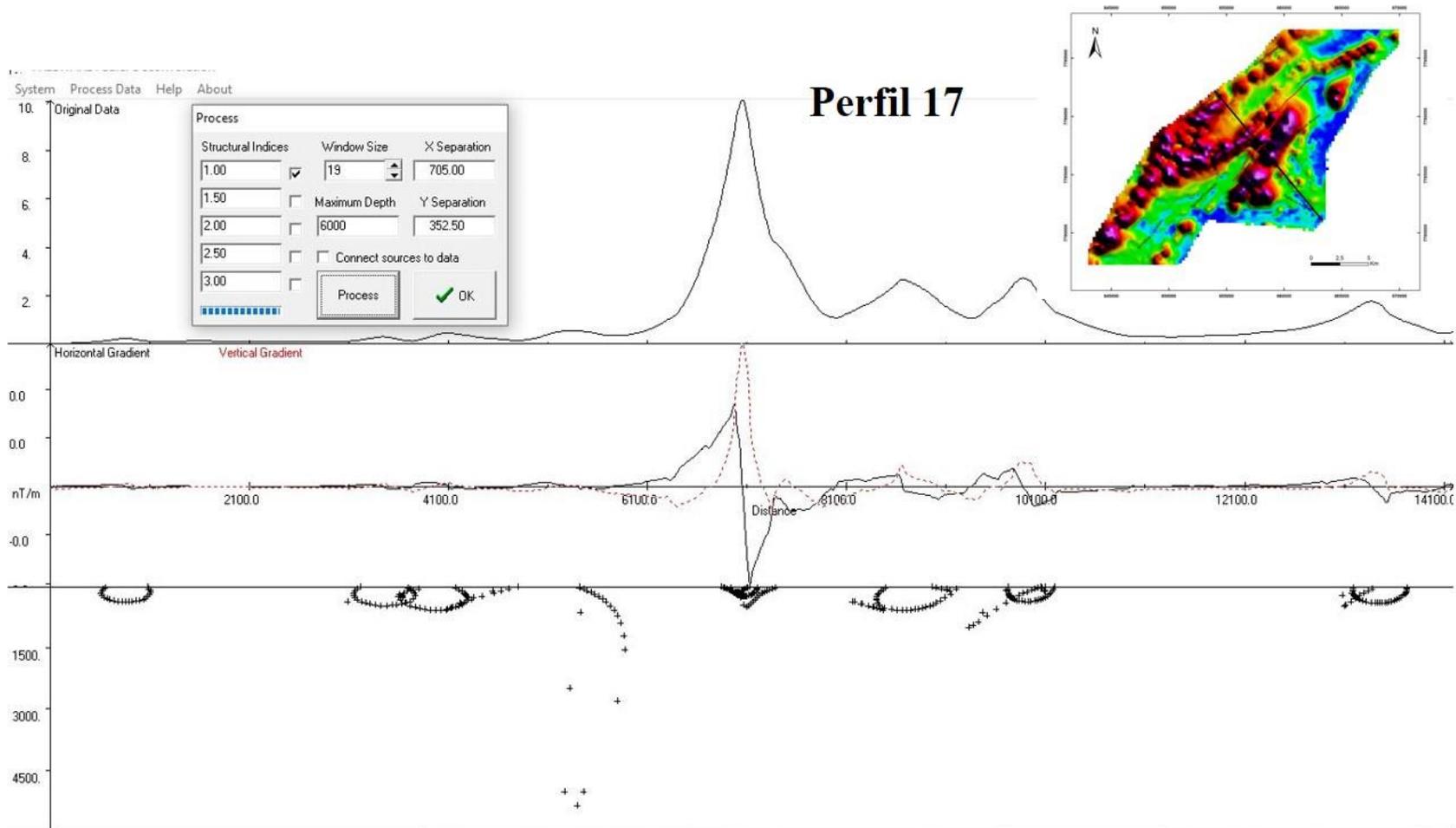


Figura 5.4 – Perfil 17 de Deconvolução de Euler.

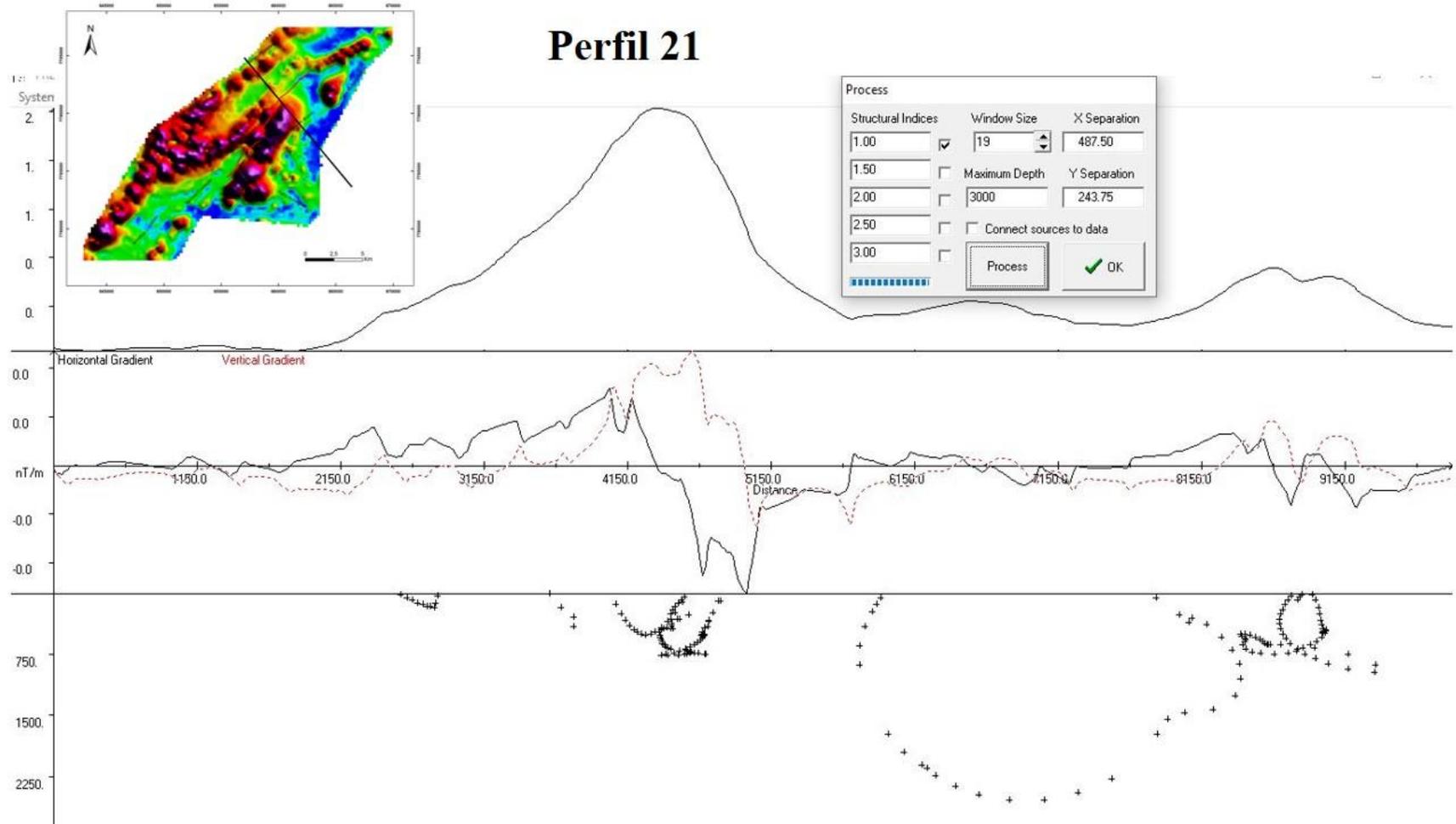


Figura 5.5 - Perfil 21 de deconvolução de Euler.

A partir da resposta da deconvolução dos 30 perfis geofísicos, foi feita a interpolação desses dados pelo método de krigagem e, posteriormente, gerado o modelo de visualização 3D da área de estudo a partir do resultado da interpolação. Isso permite que os dados obtidos em 2D fosse expandido e interpretada em 3D (Figura 5.6).

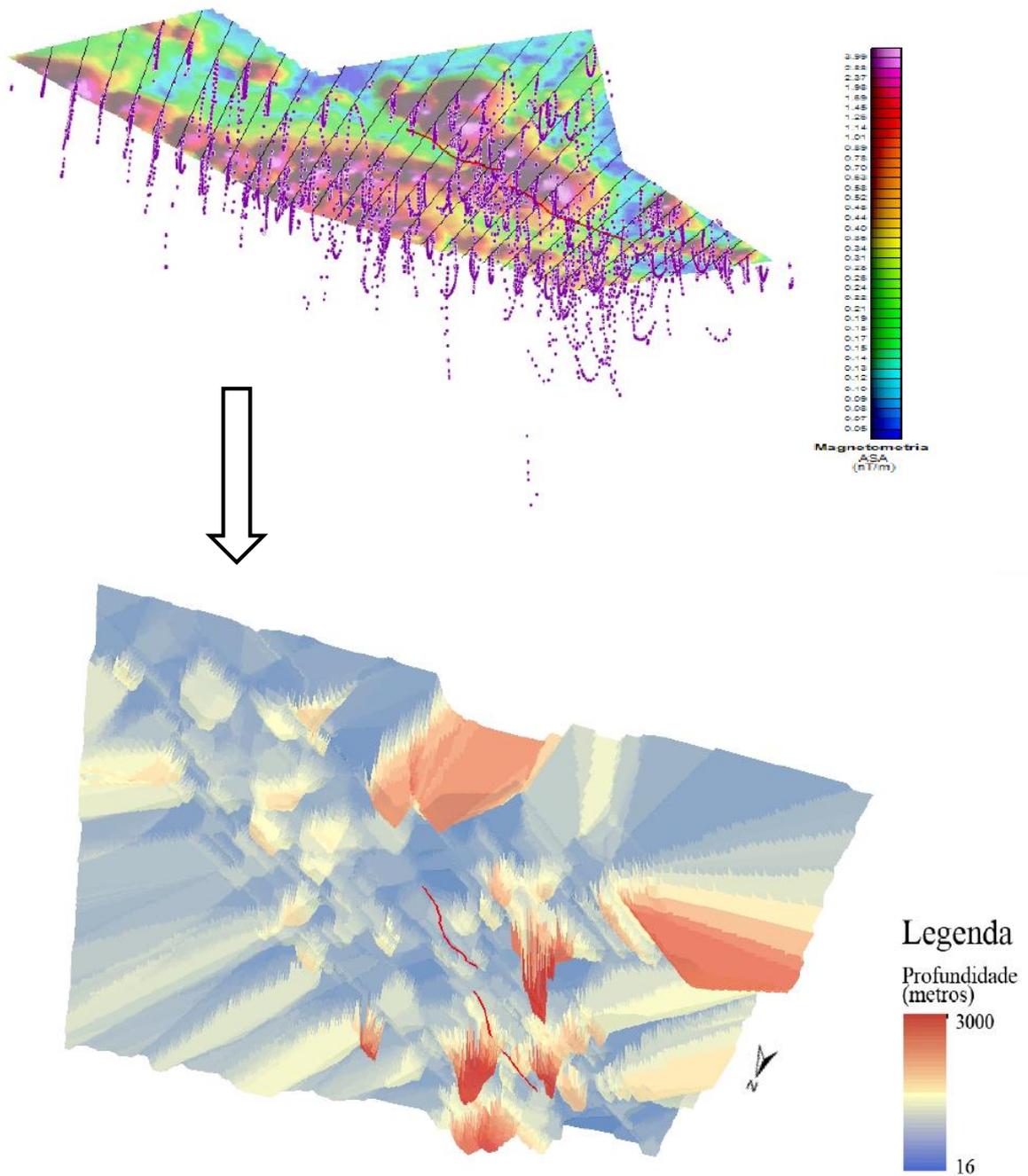


Figura 5.6 – Resultado da Deconvolução de Euler plotados no mapa ASA (legenda da escala de cores na figura 5.1) e o resultado da interpolação dos dados pela krigagem.

O resultado do modelo 3D é apresentado de forma mais detalhada na Figura 5.7, com a visualização de diferentes ângulos de visada da imagem.

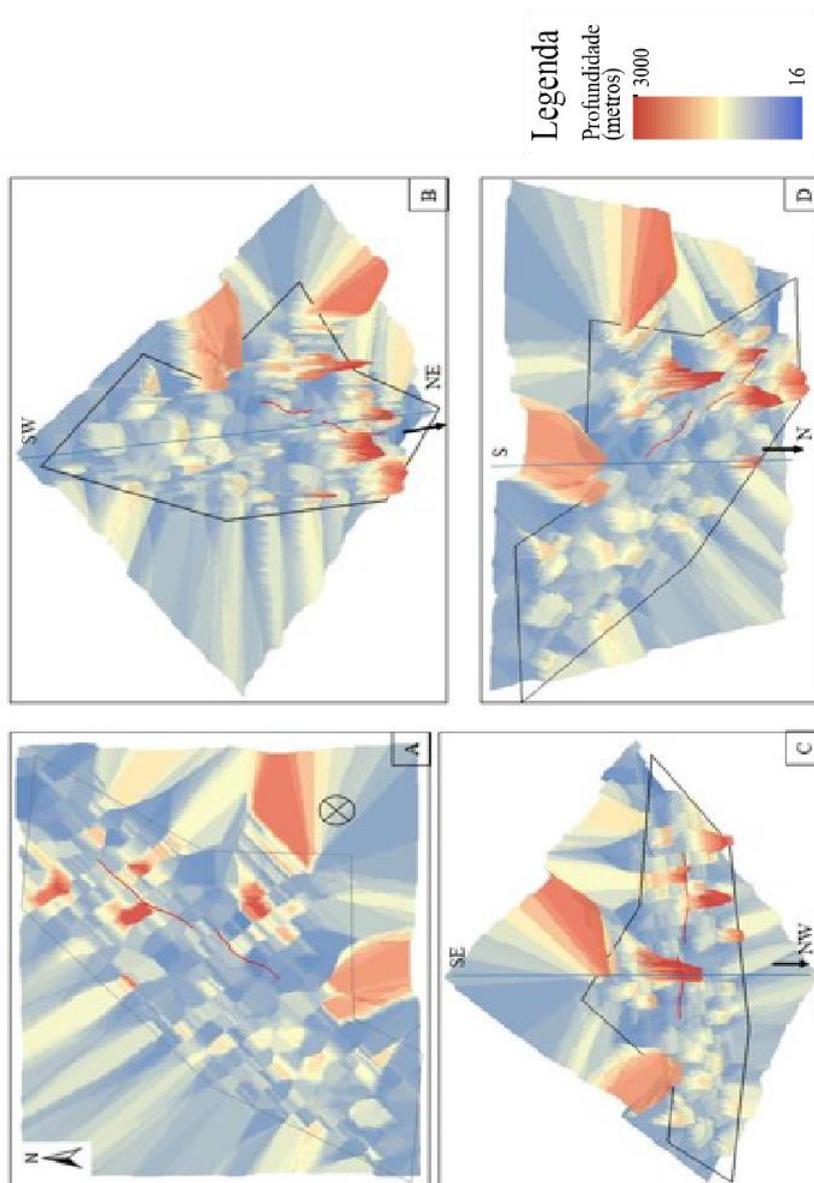


Figura 5.7 - Resultado da Krigagem em visualização 3D de diferentes ângulos de projeção.

6.1 INTRODUÇÃO

A integração geológico-geofísica tem a finalidade de correlacionar as informações obtidas a partir das análises quali-quantitativas com o ambiente geológico (Figura 6.1). Este capítulo dedica-se à integração e à discussão desses resultados e as conexões geológico-geofísicas.

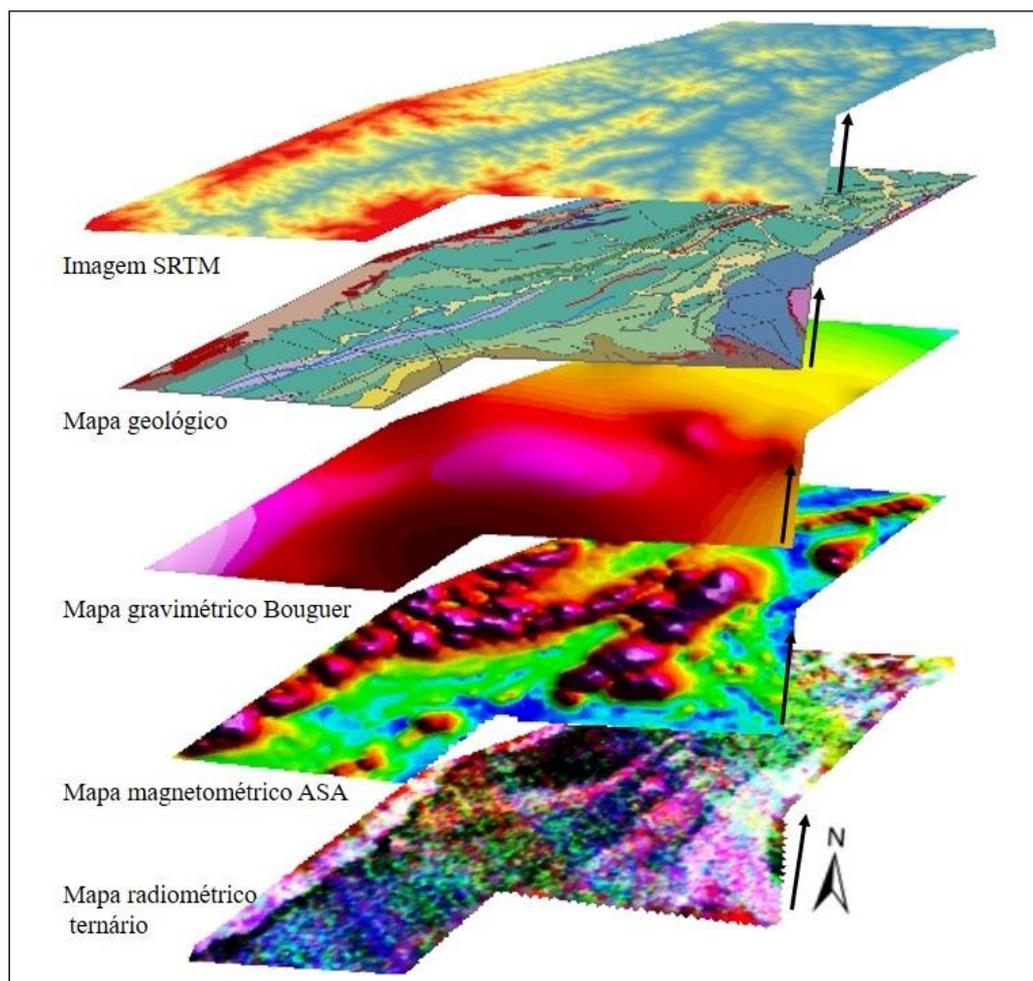


Figura 6.1 - Integração dos mapas geológico e geofísicos.

No processo de análise dos mapas verificou-se que existem anomalias que estão presentes na maioria deles. A partir dessa observação, delimitou-se essas anomalias aproximadamente para a determinação espacial de cada uma e foram denominadas S, T, U e V. A Figura 6.2 indica a ocorrência dessas anomalias em termos de localização no mapa geológico, precisamente sobre as unidades Córrego

do Sítio ou Santa Quitéria. Tal nomenclatura será utilizada à análise detalhada para cada método no tópico de discussão dos resultados a seguir.

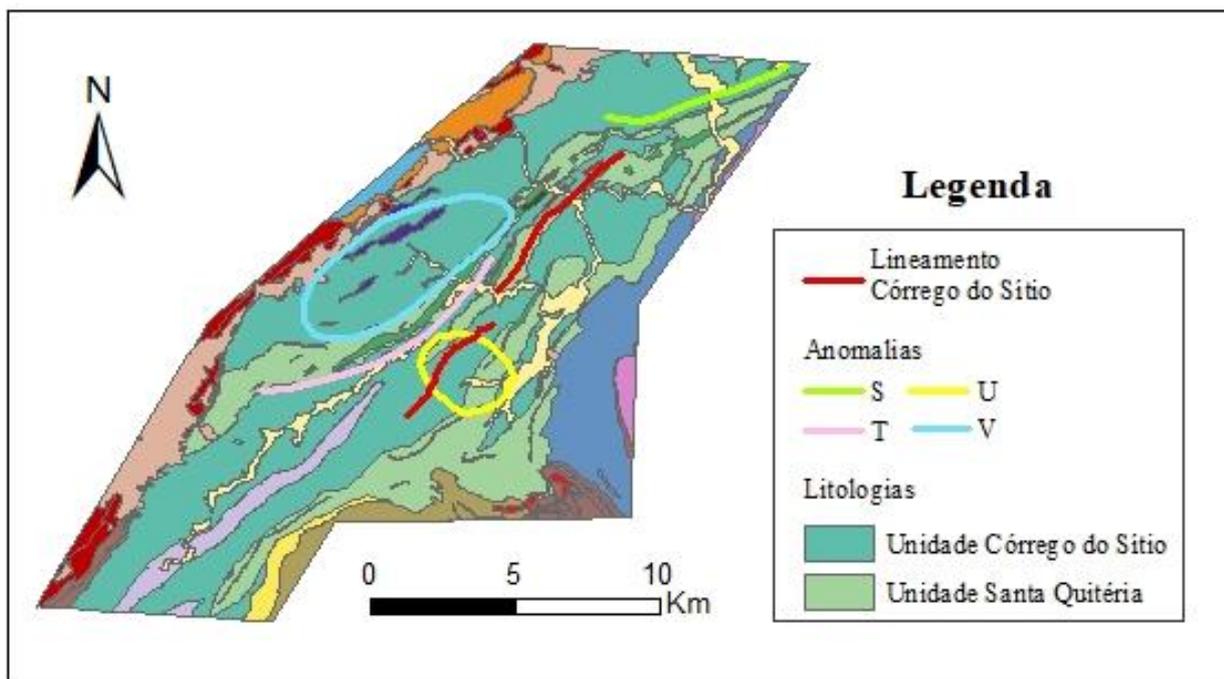


Figura 6.2 – Indicação da localização de anomalias geofísicas sobre o mapa geológico, identificadas a partir da compilação de dados dos mapas geofísicos. A legenda das demais unidades se encontra na Figura 2.6.

6.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Gravimetria

O estudo gravimétrico foi feito a partir de uma expansão da área de estudo. Localmente, não há contraste de densidade significativo, dado que as rochas estudadas são de mesma natureza metassedimentar. Portanto, para esta análise, não é possível fazer uma distinção de litologia em escalas menores, assim fez-se necessário o estudo mais abrangente da área, relacionando corpos de grandes dimensões regionais.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o mapa de anomalia Bouguer e sua derivada vertical. Na imagem, é possível denominar que a porção A apresenta as menores densidades, coincidentes com os grandes corpos da área, a Serra do Gandarela e Serra do Caraça, de composição quartzítica, e o Complexo Santa Bárbara a leste, de composição ígnea intermediária a félsica (figura 6.3C). As porções C são as de mais alta densidade, que coincide com a área onde aflora as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, em que predominam rochas ricas em minerais de alta densidade, como magnetita, pirrotita e pirita, inclusive a área de estudo que está praticamente toda inserida na área do

alto gravimétrico. Isso posto e pela distribuição de densidade vista no mapa, pode-se interpretar essa área como uma região de compensação isostática local, pois a área de estudo se encontra em uma porção mais baixa topograficamente em relação ao seu entorno.

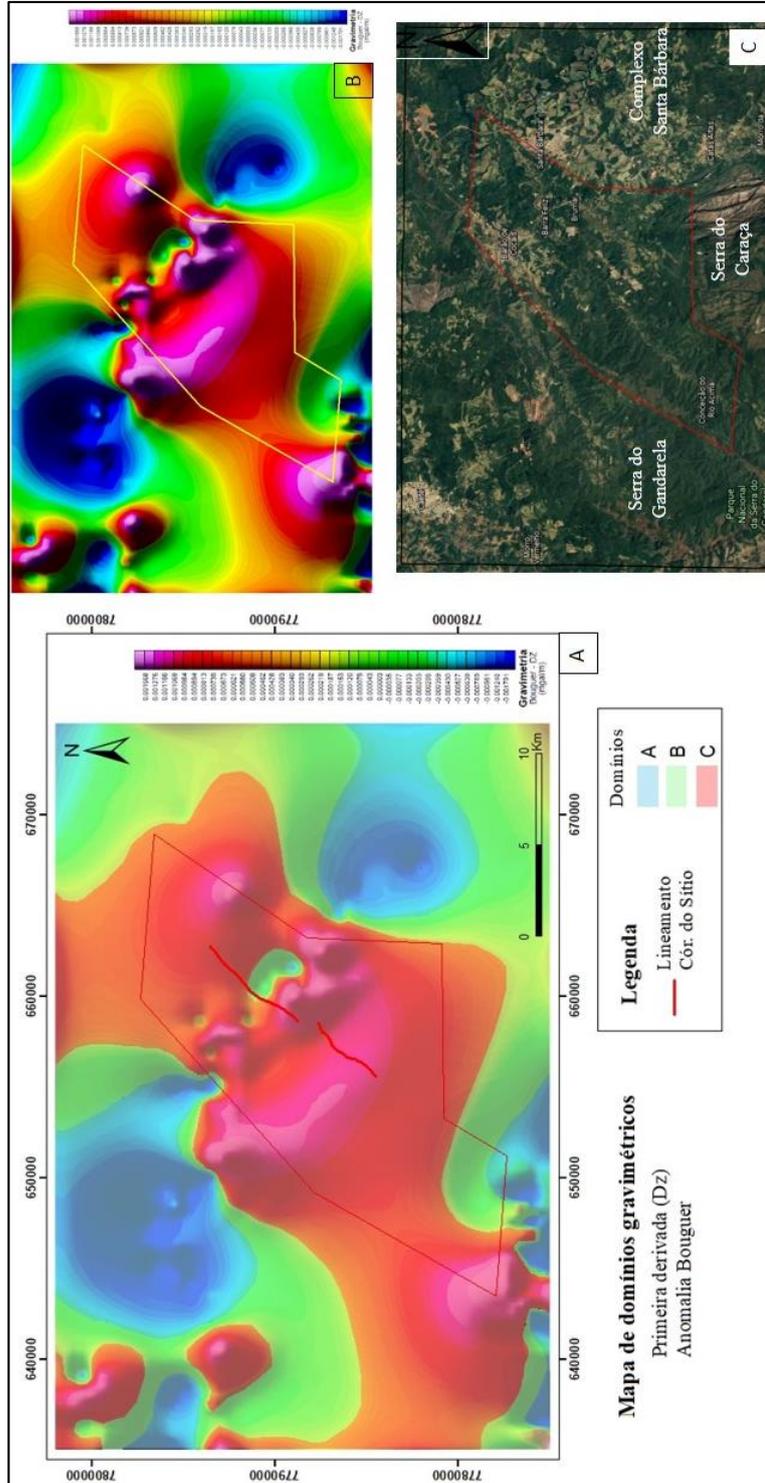


Figura 6.3 - A) Mapa de divisão em domínios gravimétricos de acordo com os intervalos de variação da densidade. B) Mapa da primeira derivada vertical Dz da Anomalia Bouguer com a demarcação da área de estudo. C) Imagem aérea da área de abrangência da análise gravimétrica com a demarcação da área de estudo e indicação das principais estruturas que compõem a região.

Os lineamentos gravimétricos indicaram apresentaram orientações tal qual Muniz (2017), sendo a direção principal N-S, equivalente às estruturas de origem do evento Brasileiro. A direção E-W é interpretada como uma orientação subordinada à direção principal, em virtude de possíveis falhas transcorrentes que podem ocorrer nesse contexto. E a direção NW-SE apresenta menor expressão no método, mas ainda assim pode ser associada à reativação de estruturas pretéritas com sua geração relacionada a um evento dúctil como propõe Sartorato (1997).

Magnetometria

A partir dos mapas magnetométricos pode-se observar feições que se equiparam com o contexto geológico (Figura 6.4). No mapa ASA as maiores anomalias possuem o trend preferencial NE-SW, como as anomalias S e T, determinadas na Figura 6.2 e congruentes a extensos lineamentos da área, principalmente o lineamento Córrego do Sítio. Observa-se que o contraste de valores de susceptibilidade é abrupto e coincidem, em geral, com os contatos litológicos e grandes lineamentos estruturais.

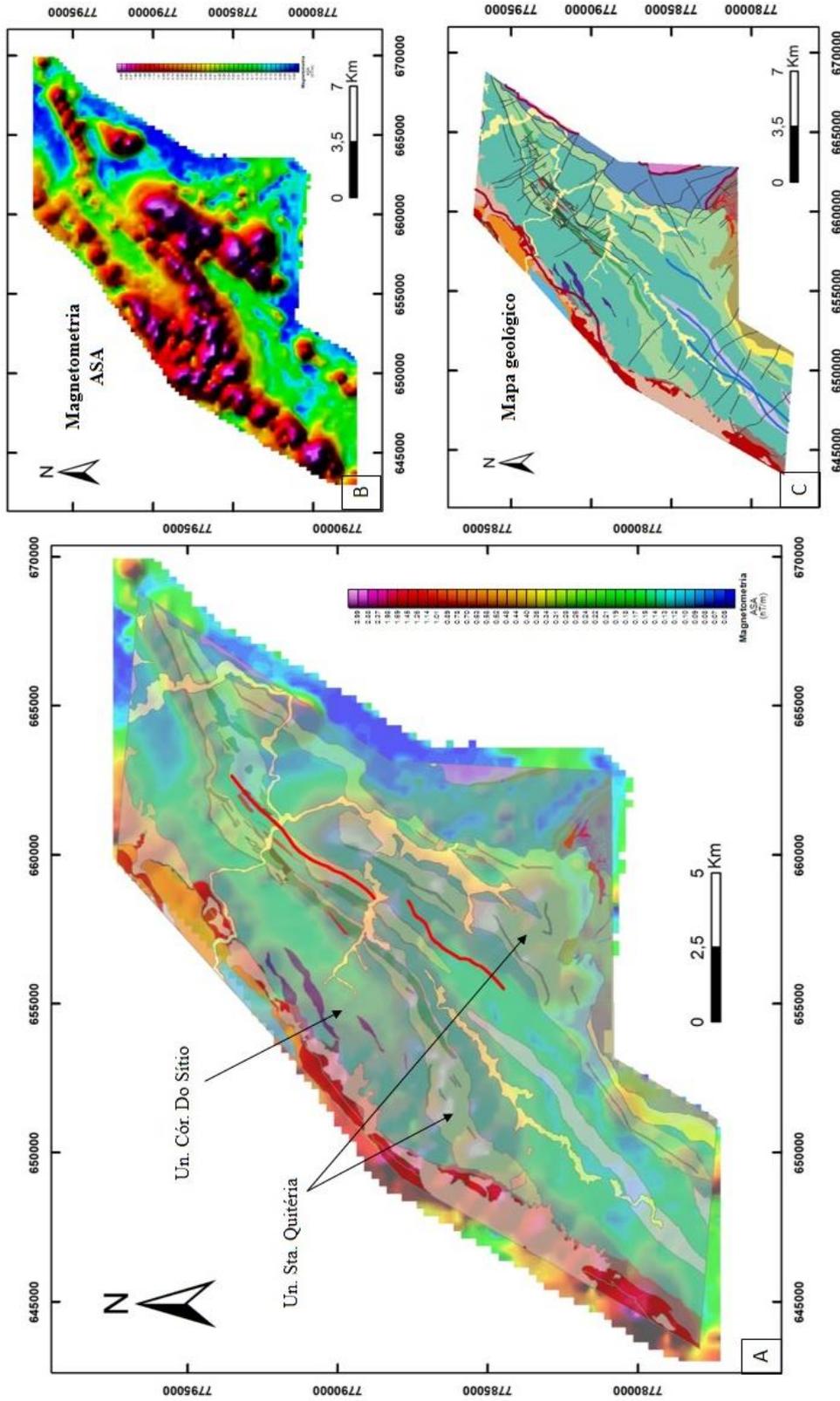


Figura 6.4 – A) Sobreposição do mapa geológico sobre o mapa magnetométricos ASA. B) Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA). C) Mapa geológico.

A divisão em magnetofácies facilita a interpretação do mapa ASA (Figura 6.5). A magnetofácies 1 de baixa amplitude, predomina nas porções NE e SE da área, consequência da baixa susceptibilidade magnética das rochas presentes. Essas porções correspondem aos gnaisses do Complexo Santa Bárbara, intrusões graníticas do granito Peti, parte das rochas metassedimentares do Grupo Maquiné e Grupo Quebra Ossos.

A magnetofácies 2, na amplitude intermediária, ocorre na maior parte da área, principalmente na porção mais a sul e a noroeste. Essa categoria corresponde principalmente às áreas que se encontram rochas metassedimentares das unidades Mindá e Córrego do Sítio, além de parte da unidade Quebra Ossos e parte do Supergrupo Minas na borda NW da área.

A magnetofácies 3 de alta amplitude, ocorre principalmente na porção central se estendendo a sudoeste, que coincide com as ocorrências de formações ferríferas da Unidade Santa Quitéria, e a oeste corresponde às rochas do Supergrupo Minas, principalmente onde afloram rochas da Formação Cauê (Grupo Itabira).

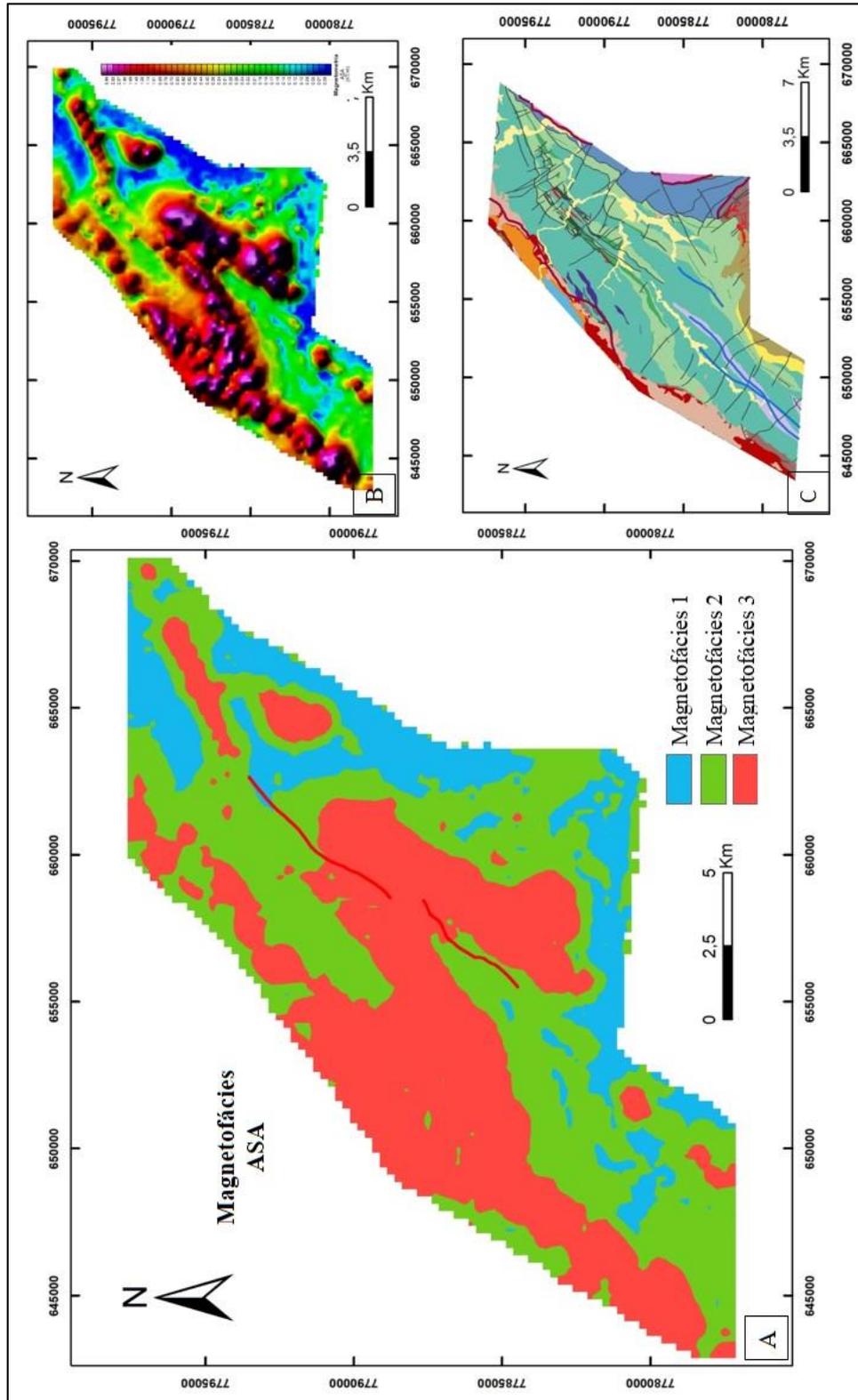


Figura 6.5 – Mapa de magnetofácies do mapa ASA. A) Categorização em magnetofácies do mapa ASA. B) Mapa geofísico ASA. C) Mapa geológico.

As anomalias indicadas na figura 6.2 foram plotadas no mapa TILT (Figura 6.6) com a finalidade de indicação da fonte dessas principais anomalias, dado que o mapa de inclinação do sinal analítico (TILT) evidencia o mais provável centro anômalo. A anomalia denominada S e T ocorrem nas porções onde afloram as BIF's da unidade Santa Quitéria, com orientação aproximadamente NE-SW em uma faixa delgada, que pode coincidir com o contato desta unidade com a unidade Córrego do Sítio. Na porção central a anomalia U ocorre exatamente em cima do lineamento Córrego do Sítio (extensão sul), inserido nas unidades principais de estudo, Córrego do Sítio e Santa Quitéria, onde predomina uma série de zonas de cisalhamento e coincidente com a terminação do lineamento Cristina (Figura 2.6.), além de uma grande quantidade de minas de ouro próximas. A anomalia V é a de maior dimensão, e aponta uma fonte que se encontra na porção em que aflora a unidade Córrego do Sítio, composta basicamente por rochas metassedimentares. Nessa porção, é descrita a ocorrência de formação ferrífera, mas é pouco expressiva na área, e está entre a Falha de Fundão e uma zona de cisalhamento no contato com a unidade Santa Quitéria.

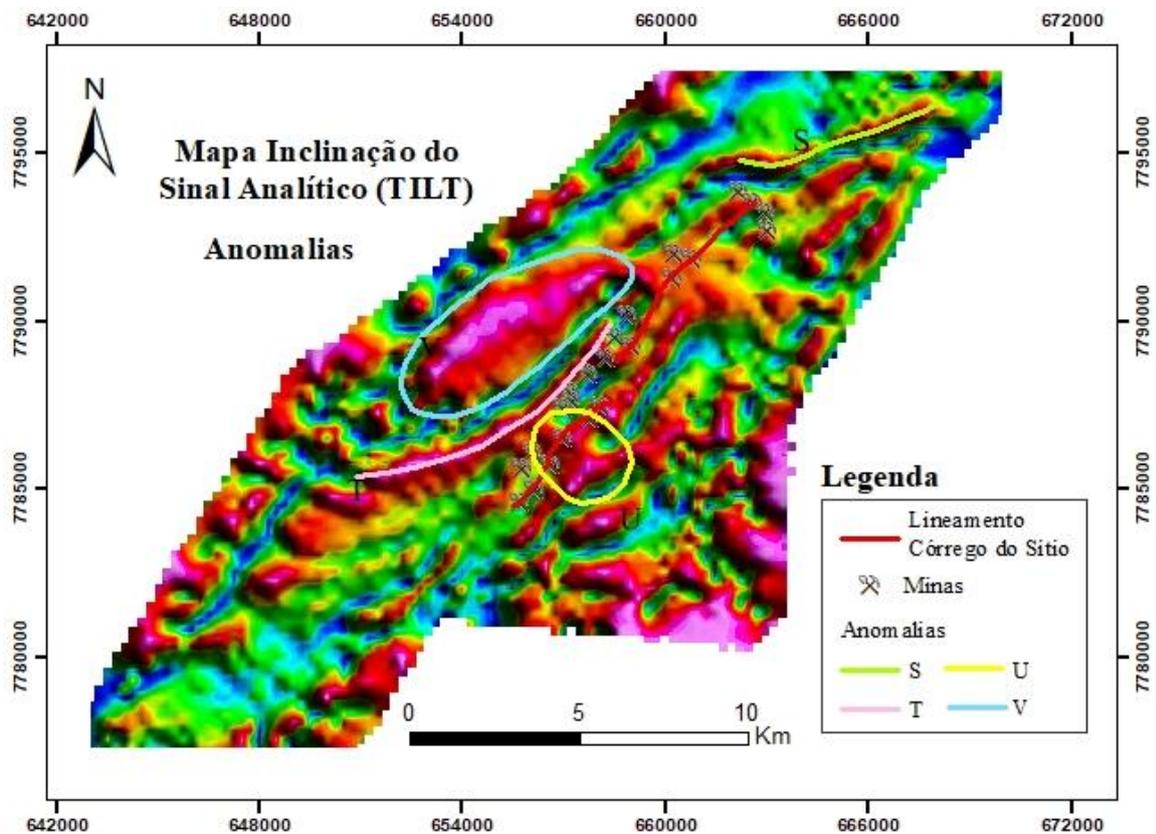


Figura 6.6 - Mapa TILT com delimitação de anomalias pontos importantes de fontes de anomalias.

Os mapas das derivadas do campo (Figura 6.7) salientam direções principais de anomalias, como as direções N-S e NE-SW, principalmente, e reiteram a ocorrência das anomalias S, T e U (Figura 6.2), justamente onde ocorrem as formações ferríferas que são aflorantes.

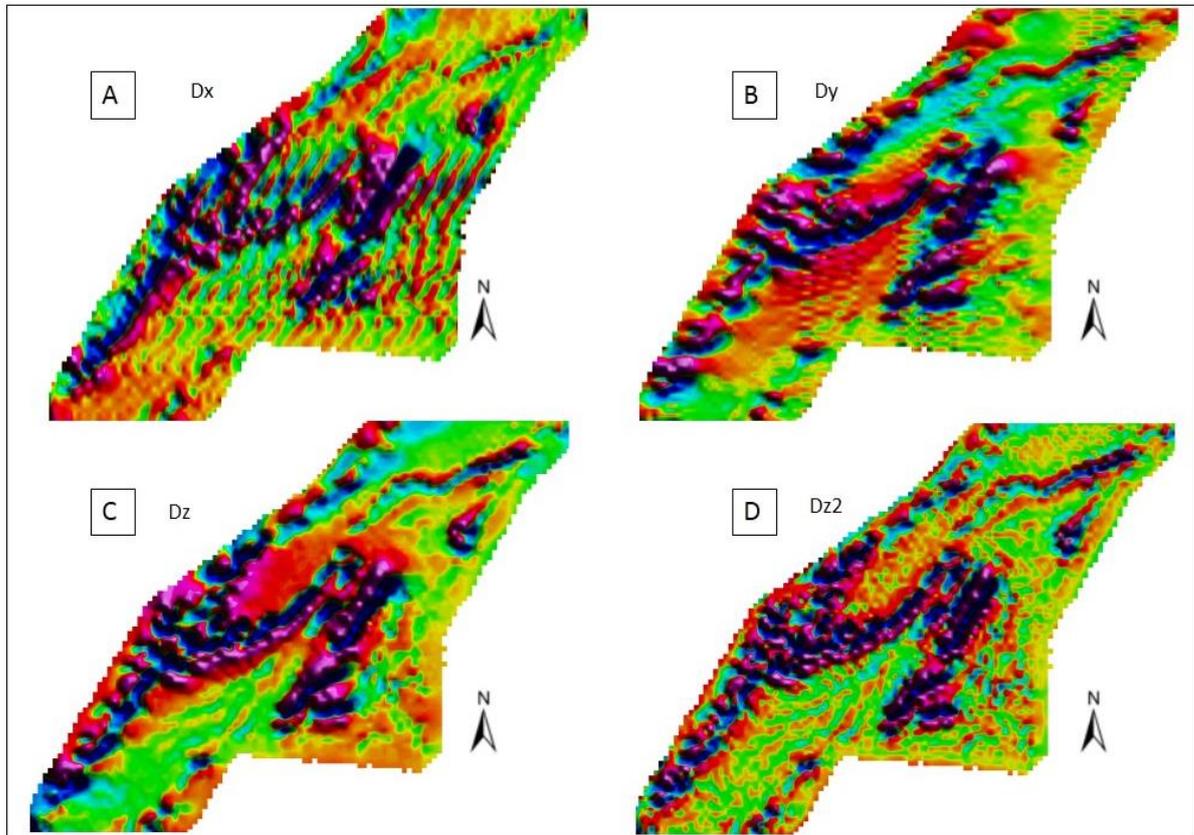


Figura 6.7 - Mapas de derivadas. A) Derivada horizontal no eixo x. B) Derivada horizontal no eixo y. C) Derivada vertical no eixo z. D) Segunda Derivada vertical no eixo z.

Radiometria

Para a interpretação, todos os mapas radiométricos apresentaram respostas satisfatórias, exceto os de razão U/Th e U/K, que não mostraram características relevantes para esse contexto. A avaliação das radiofácies foram realizadas a partir do mapa ternário, que apresenta a variação da concentração dos três principais radioelementos, U, Th e K. Os campos de cada radiofácies podem ser correlacionados à geologia (Figura 6.8).

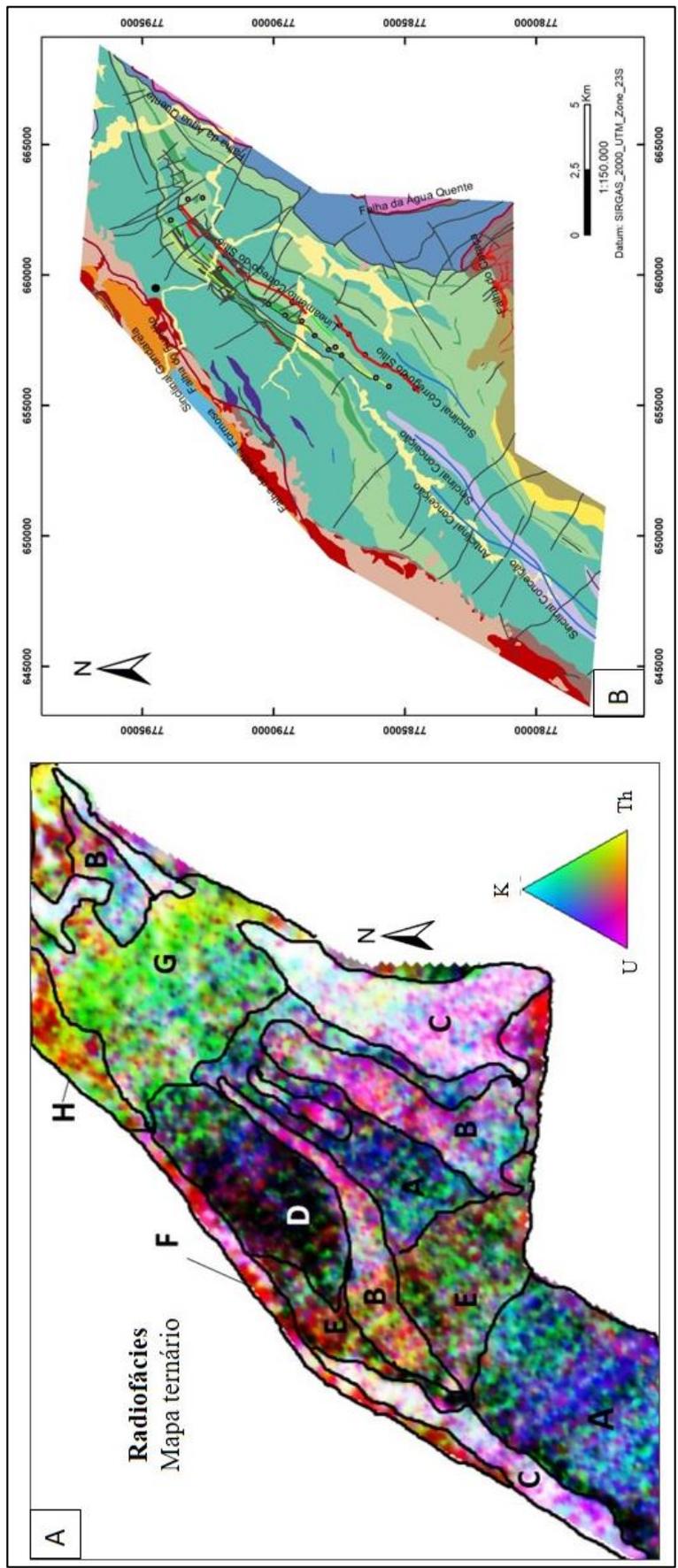


Figura 6.8 - A) Mapa radiométrico ternário categorizados pelas radiofácies. B) Mapa geológico.

Na área onde ocorre a unidade Córrego do Sítio, as concentrações dos elementos são variáveis, pois essa unidade tem características heterogêneas, em termos de espessura e de composição mineralógica. A fácies E apresenta uma quantidade muito oscilante dos três elementos, ora variando entre quantidades de U e Th, ora K e Th. A fácies D apresenta a cor preta e isso indica uma concentração muito baixa dos três elementos em relação à área toda (Ribeiro *et al.* 2013), e esse aspecto pode ser associado, por exemplo, à composição de rochas de composição ferríferas, cuja composição é pobre em variedade de minerais e elementos químicos.

Altas concentrações de potássio e urânio podem indicar forte hidrotermalismo (Ribeiro *et al.* 2013), dessa forma, é possível identificar no mapa áreas que possuem essa característica, que são as fácies A e B. As duas porções também se observam os traços que correspondem ao de alguns contatos, por exemplo onde ocorre a unidade Santa Quitéria em contato com a unidade Córrego do Sítio. A fácies G, que apresenta composição radiométrica variando de potássio a alta concentração de tório, evidencia uma taxa elevada de intemperismo químico, já que o potássio é um elemento móvel e o tório não, por isso tende a se concentrar.

O mapa de Fator F (Figura 6.9) também ressalta evidências de ação hidrotermal, podendo realçar o enriquecimento em potássio e urânio em proporção ao tório. Dado que as anomalias positivas indicam as mais altas concentrações de potássio e urânio, é possível identificar indícios de um forte hidrotermalismo nas áreas que correspondem à unidade Córrego do Sítio nas porções de alto valores radiométricos.

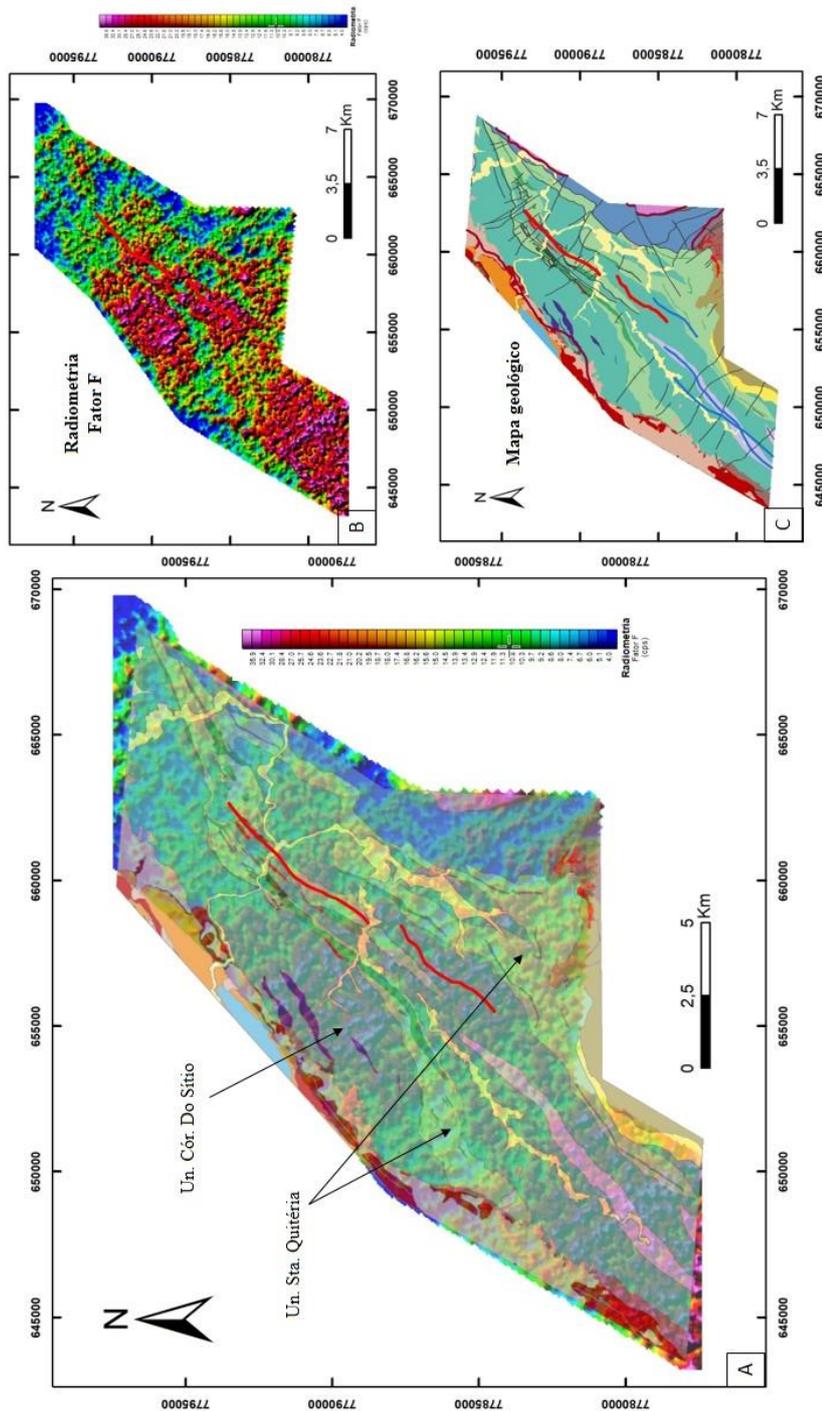


Figura 6.9 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométrico de concentração pelo fator F. B) Mapa radiométrico de concentração pelo fator F. C) Mapa geológico.

O mapa da razão de Th/K (Figura 6.10) apresenta anomalias intermediárias a negativas que ocorrem predominantemente na área que ocorre a unidade Córrego do Sítio, o que indica uma maior concentração de potássio. Dado que esse elemento possui um alto potencial de mobilização, tal anomalia também sugere episódios de forte hidrotermalismo nessa região. Em contrapartida, as anomalias positivas, caracterizadas pelo alto teor de tório, se encontram nas porções de predomínio das rochas ultramáficas do Grupo Quebra Ossos, e onde afloram formações ferríferas, tanto da unidade Santa Quitéria, quanto do supergrupo Minas.

O mapa de concentração de potássio (Figura 6.11) apresenta anomalias positivas dentro dos limites da unidade Córrego do Sítio, principalmente, em consequência de sua origem metassedimentar e composição principal de minerais micáceos. De maneira oposta, as anomalias negativas ocorrem, principalmente, onde se verifica a unidade Quebra Ossos que são geneticamente empobrecidas em potássio devido a sua origem ultramáfica, as rochas do Grupo Maquiné, em que predomina rochas quartzosas, e a extremo oeste do mapa, onde ocorrem coberturas lateríticas e onde afloram rochas as formações ferríferas da Formação Cauê.

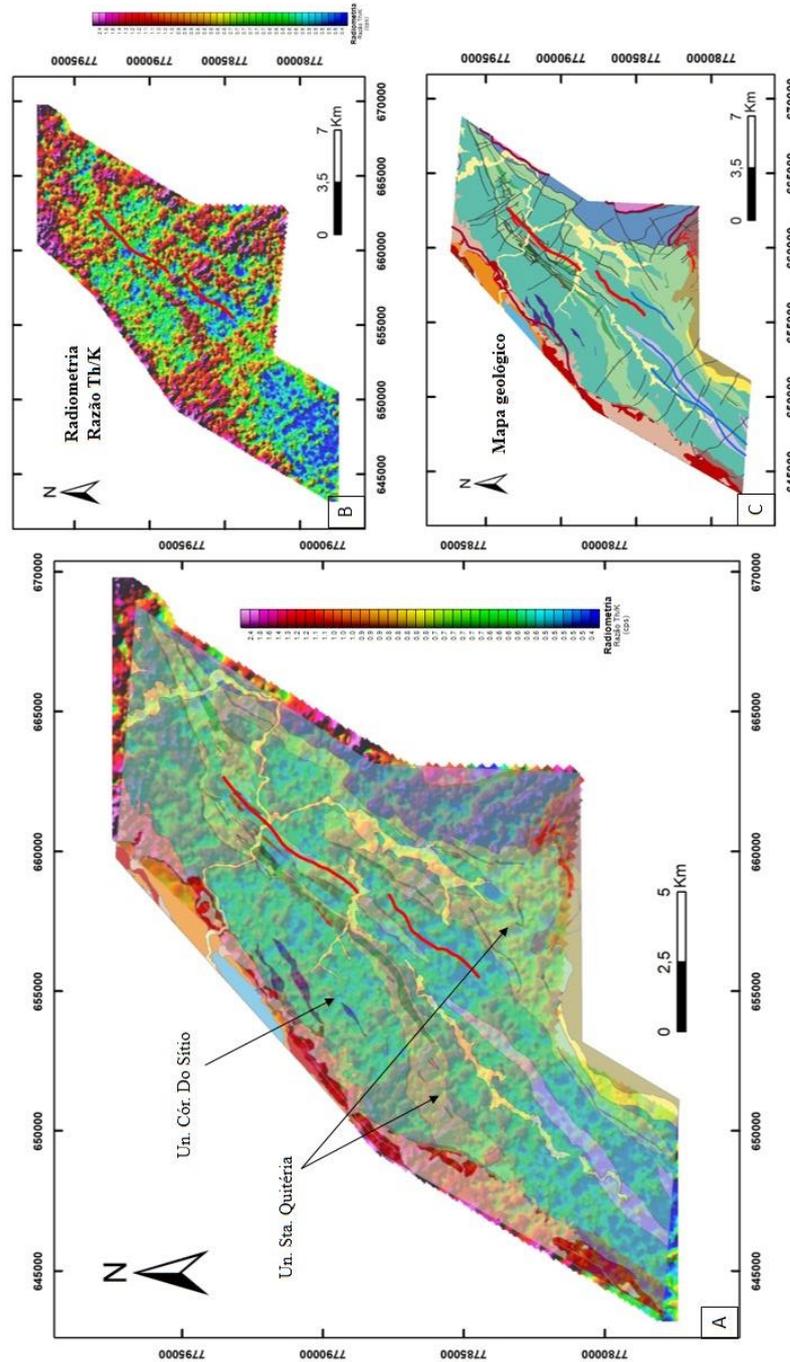


Figura 6.10 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométrico de concentração pela razão de tório por potássio (Th/K). B) Mapa radiométrico de concentração pela razão de tório por potássio (Th/K). C) Mapa geológico.

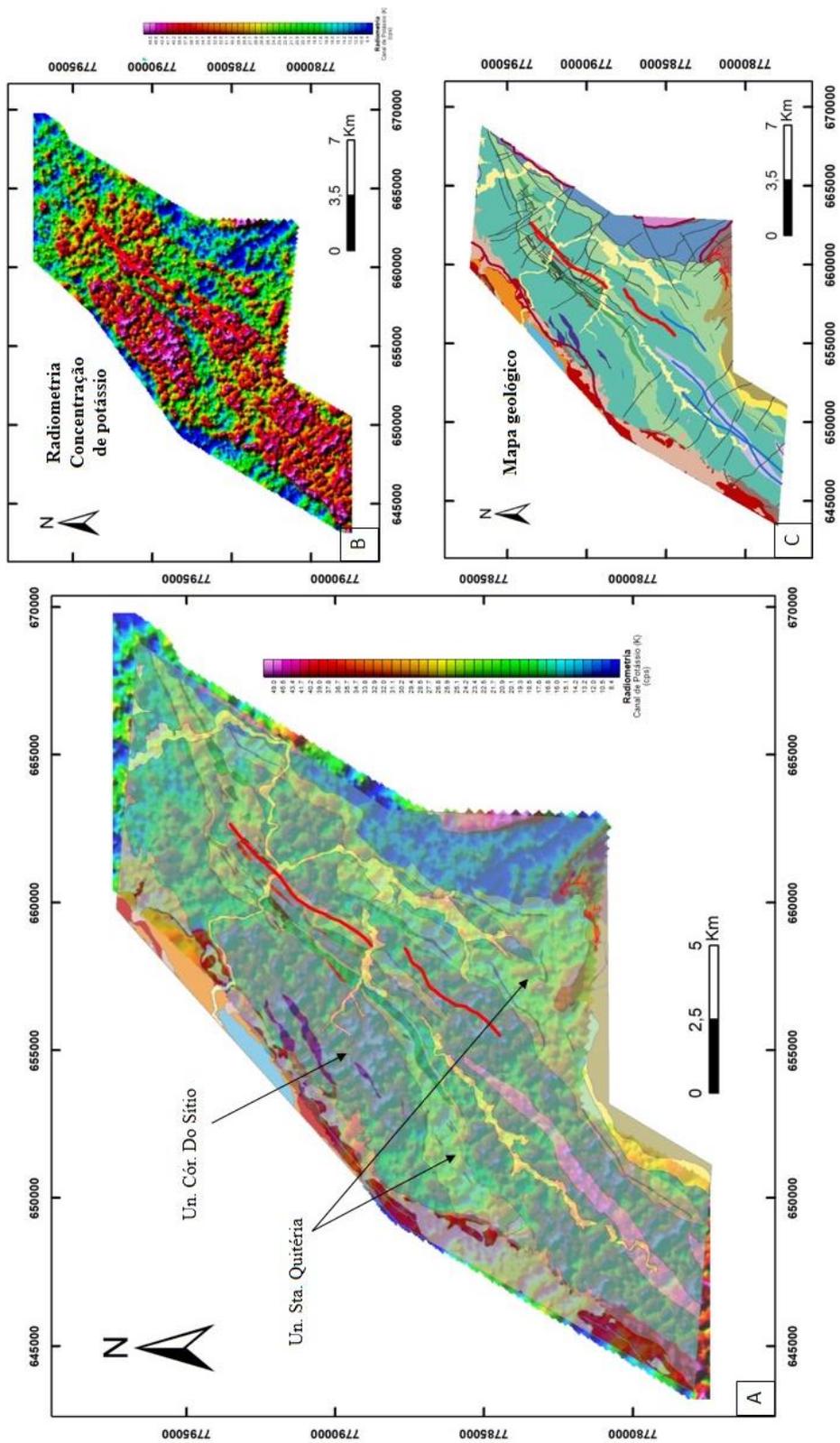


Figura 6.11 - A) Mapa geológico em sobreposição ao mapa radiométricos de concentração de potássio. B) Mapa radiométrico de concentração de potássio. C) Mapa geológico.

Vale ressaltar que em todos os mapas radiométricos pode-se verificar uma forte anomalia que apresenta uma geometria semelhante, delimitada por um círculo amarelo (Figura 6.12), correspondente à anomalia V, identificada na Figura 6.2. Essa anomalia se expressa onde afloram as rochas da unidade Córrego do Sítio e a compilação das informações para essa porção que permitiu detectar características que sugerem uma área com efeito de hidrotermalismo, pois possui anomalias positivas de contagem total de isótopos, baixa concentração dos principais radioelementos (mapa ternário), entretanto, possui alto fator F e alta concentração de K.

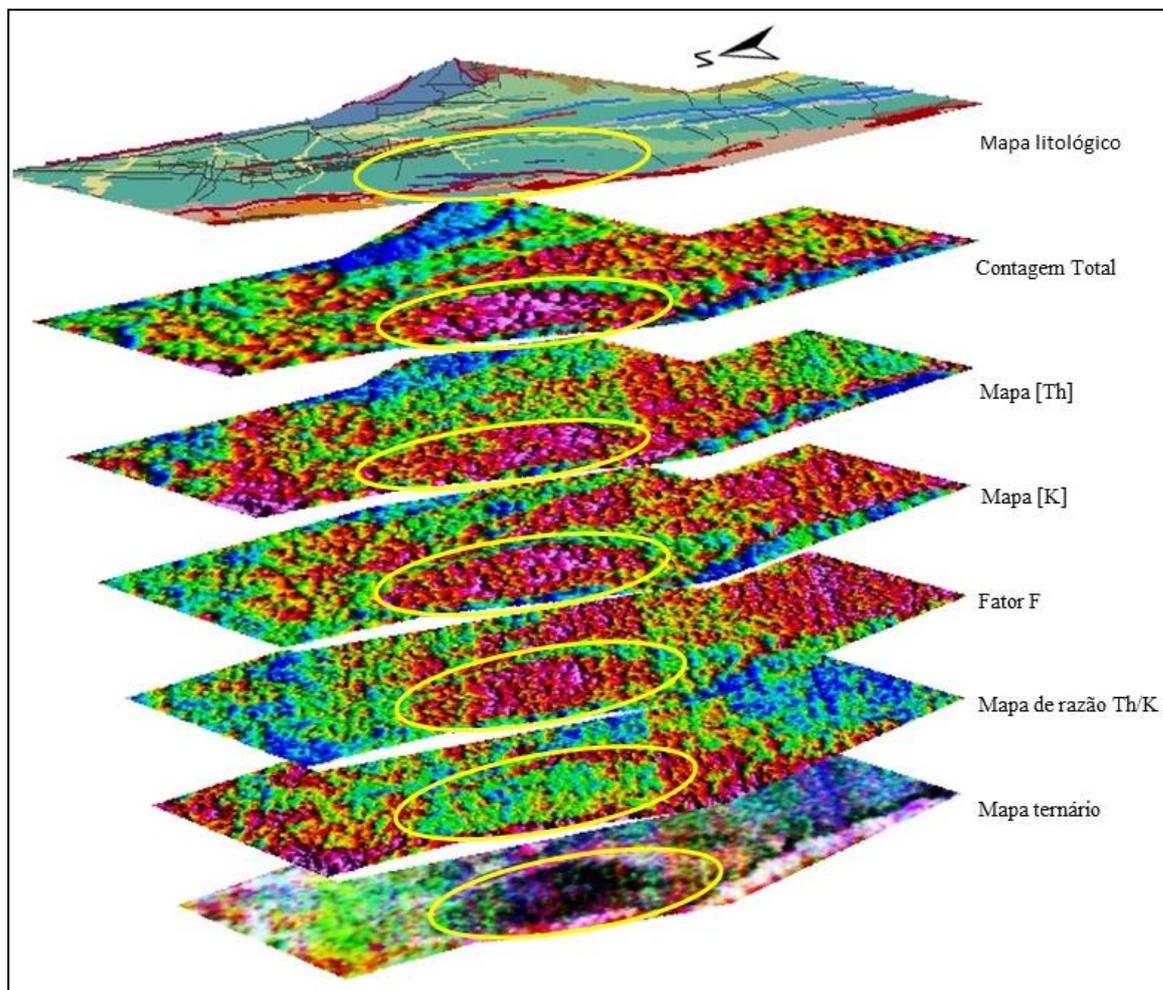


Figura 6.12 - Sobreposição de todos os mapas radiométricos com evidência de anomalia coincidente em cada um dos mapas. Em destaque a anomalia V, inserida na litologia da Fm. Córrego do Sítio

Os lineamentos radiométricos foram traçados a partir do mapa de concentração de potássio, pois foi o que mais se aproximou do mapa geológico quanto aos contatos em que apresenta melhores lineamentos. As direções preferenciais são E-W, NE, NW, e a principal é N. Os lineamentos na direção N-S são consequência do evento Brasiliano representadas por estruturas de estiramento mineral e estruturas na direção E-W, perpendiculares a N-S, também são resultantes deste mesmo evento

(Sartorato 1997). De acordo com Muniz (2017), a direção E-W é interpretada como causada por falhas transcorrentes desse mesmo evento Brasileiro, semelhante aos lineamentos magnetométricos. Os lineamentos de direção NE são coincidentes com a orientação da foliação das rochas da região, bem marcada, pois a concentração de potássio é mais evidente nos metassedimentos, e os de direção NW coincidem com aqueles lineamentos magnetométricos, originados pelas zonas de cisalhamento reativadas.

Deconvolução de Euler

A partir dos resultados apresentados da Deconvolução de Euler (Tabela 5.1), é possível observar que, em geral, as anomalias são rasas, com profundidades máximas menores que 2km e o topo, muitas vezes, aflorantes, ou bem próximo da superfície, com raras exceções de pontos que ultrapassam 2km de profundidade. Por vezes, essas anomalias são coincidentes com o contato litológico e zonas de cisalhamento, onde afloram as BIF's, rochas pertencentes à Formação Santa Quitéria, e podem ser vistas com a análise detalhada dos perfis 17 e 21 como na Figura 6.13.

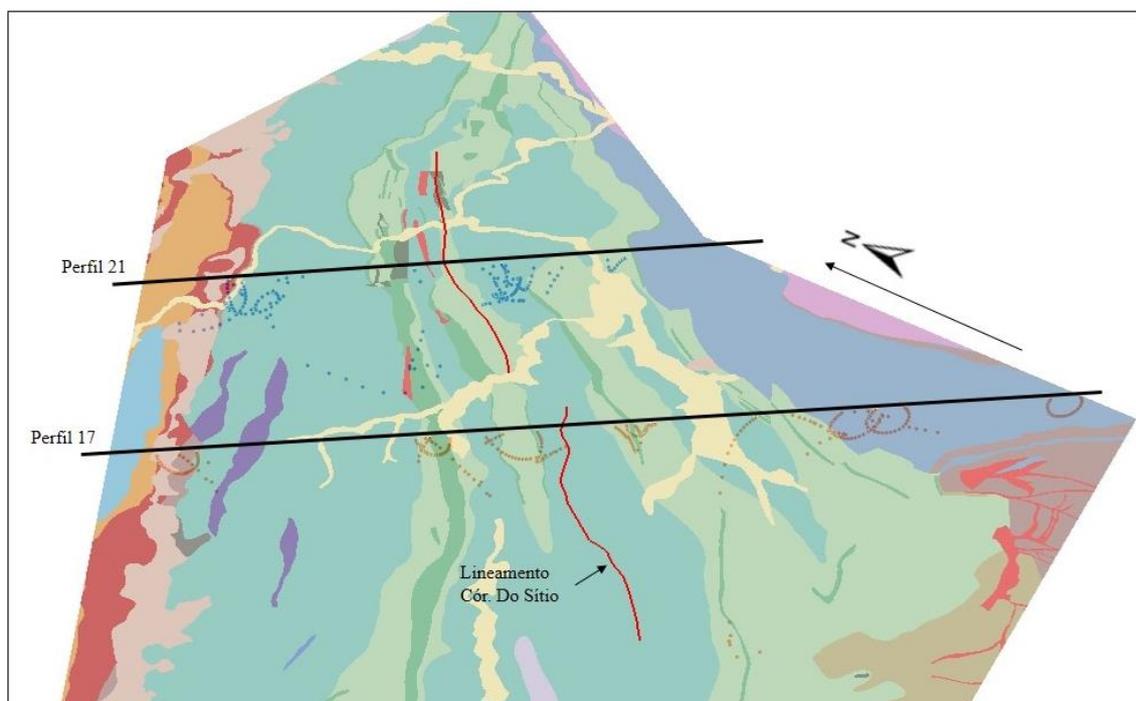


Figura 6.13 - Deconvolução de Euler dos perfis 17 e 21 plotados sobre o mapa geológico (legenda do mapa na figura 2.6).

A interpretação dos perfis de Deconvolução foram sustentados pela elaboração do esboço de perfis geológicos, baseados no trabalho de Lima (2012). Cada perfil magnético, 17 e 21, foi dividido em três domínios com o agrupamento das anomalias para sua interpretação.

O perfil 17 é marcado por anomalias que indicam contatos litológicos e zonas de falha. A Figura 6.14 apresenta o perfil de deconvolução (A) separado em domínios pelo traço vertical vermelho e uma seção geológica esquemática (B) a fim de comparar as respostas magnéticas com as estruturas geológicas. No domínio I ocorre apenas uma litologia, o Grupo Quebra Ossos, e nessa porção ocorrem anomalias que salientam as falhas na mesma direção do perfil e o contato entre essa unidade e a unidade Santa Quitéria, marcado por uma zona de cisalhamento com mergulho para SE indicado pelo traço azul. No domínio II predominam as rochas do Grupo Nova Lima e as anomalias indicadas pelos traços verticais verdes têm topo na superfície. Pode-se identificar esse ponto como o contato litológico, com a alternância da Unidade Córrego do Sítio que não apresenta resposta magnética, e da Unidade Santa Quitéria (BIF) que tem susceptibilidades magnética alta. Os traços oblíquos na cor azul sinalizam zonas de falhas e cisalhamento que caracteriza o contato e configura essa alternância litológica, apresentando um aparente mergulho para SE. O maior pico de anomalia, este o que tem a maior profundidade (>5 km) localiza-se na unidade Santa Quitéria em uma zona de cisalhamento, e o lineamento Córrego do Sítio ocorre na unidade metassedimentar, que não coincide com nenhuma anomalia expressada pela deconvolução de Euler. O domínio III se caracteriza pelo contato entre o Grupo Nova Lima e o Supergrupo Minas, este marcado pela falha de Fundão, também com mergulho para SE.

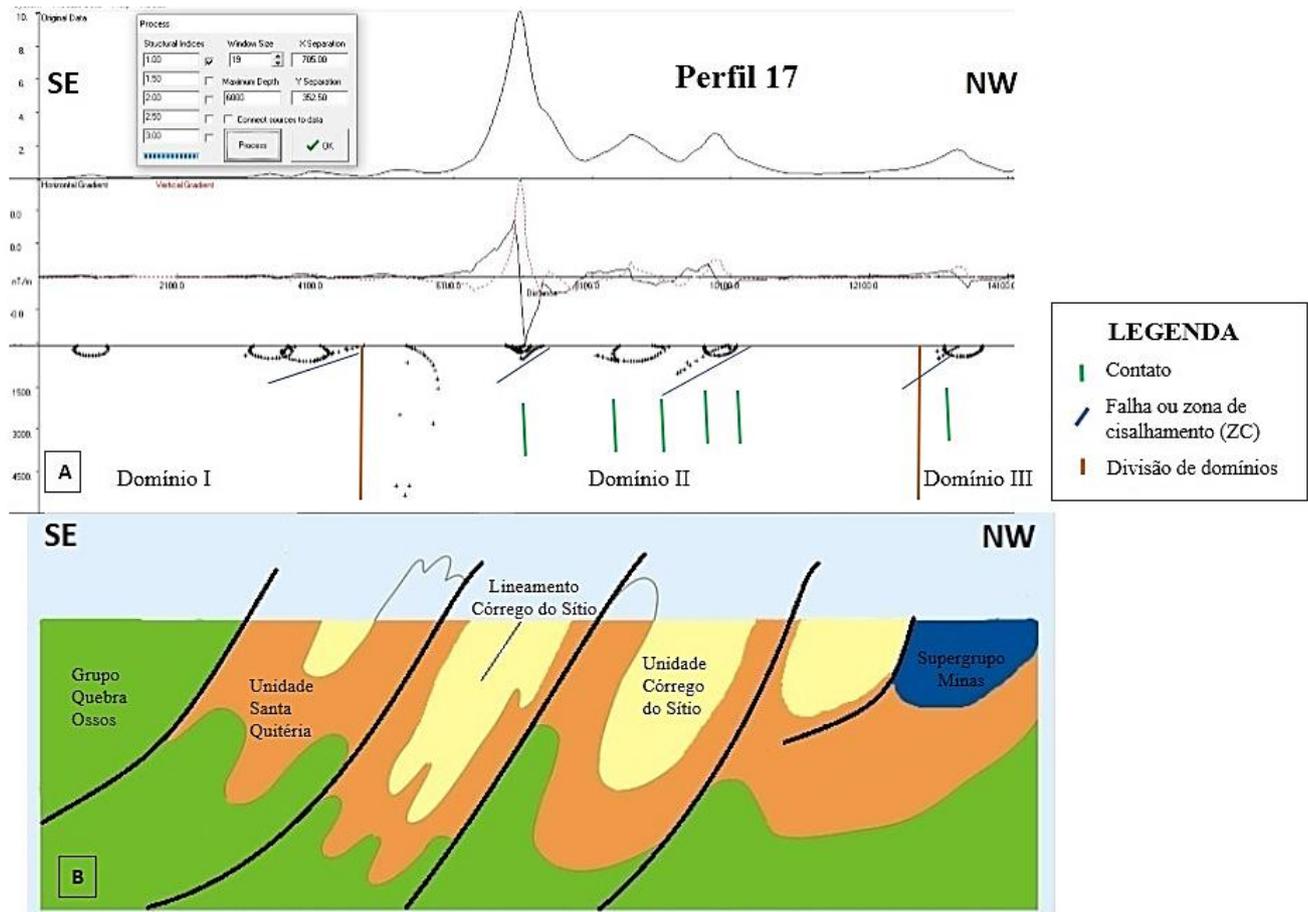


Figura 6.14 - Interpretação das anomalias magnéticas do perfil 17 pelo método da Deconvolução de Euler. A) Perfil de deconvolução de Euler orientado SE-NW, com indicação da interpretação das anomalias dividido em domínios; B) Perfil geológico esquemático (modificado de Lima 2012).

O perfil 21 também foi dividido em três domínios que expressam estruturas e litologias diferentes Figura 6.15. Nesse perfil, o domínio I abriga as rochas do Grupo Quebra Ossos e da Unidade Santa Quitéria, evidenciando duas zonas de cisalhamento com mergulho para NW indicadas pelos traços oblíquos azuis. Essa orientação remete a estruturas mais antigas (D2) que foram reativadas. O domínio II abrange a maior parte do espectro do pico magnético, que nessa porção coincide com a localização do lineamento Córrego do Sítio no centro do perfil, integrado à unidade Santa Quitéria, onde ocorrem as formações ferríferas. Os traços oblíquos azuis indicam estruturas com caimento SE concordante ao contato estrutural entre as unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria que corresponde à uma zona de cisalhamento neste local, e outro traço de caimento NW, interpretados como sendo da mesma família das estruturas do domínio I.

O domínio III representa uma porção que é definida por uma grande quantidade de lineamentos estruturais e enxame de diques. A anomalia que ocorre nesta parte apresenta um formato abaulado circulada na cor violeta, que indica anomalias mais profundas e no topo seus contatos. Como a unidade Santa Quitéria apresenta altas respostas magnéticas, pode-se prognosticar que seriam essas rochas que

continuam em grande profundidade. Essa estrutura pode conjecturar uma continuação da unidade Santa Quitéria em maiores profundidades, chegando a 3km. O enxame de diques ocorre nessa mesma unidade, onde indica o traço vertical amarelo, limitada por zonas de cisalhamento, como demonstrado no perfil (Figura 6.15B). De acordo com Porto (2013), esses diques não possuem minerais magnéticos ou em pouca quantidade, e essas intrusões ocorrem bastante localizadas e em uma escala muito pequena. Além disso, nesse mesmo domínio a extremo NW, o contato entre a unidade Córrego do Sítio e o Supergrupo Minas também é marcado por uma grande anomalia, com a Falha de Fundão de mergulho SE e o contato entre as unidades, em que aflora os BIFs da Formação Cauê.

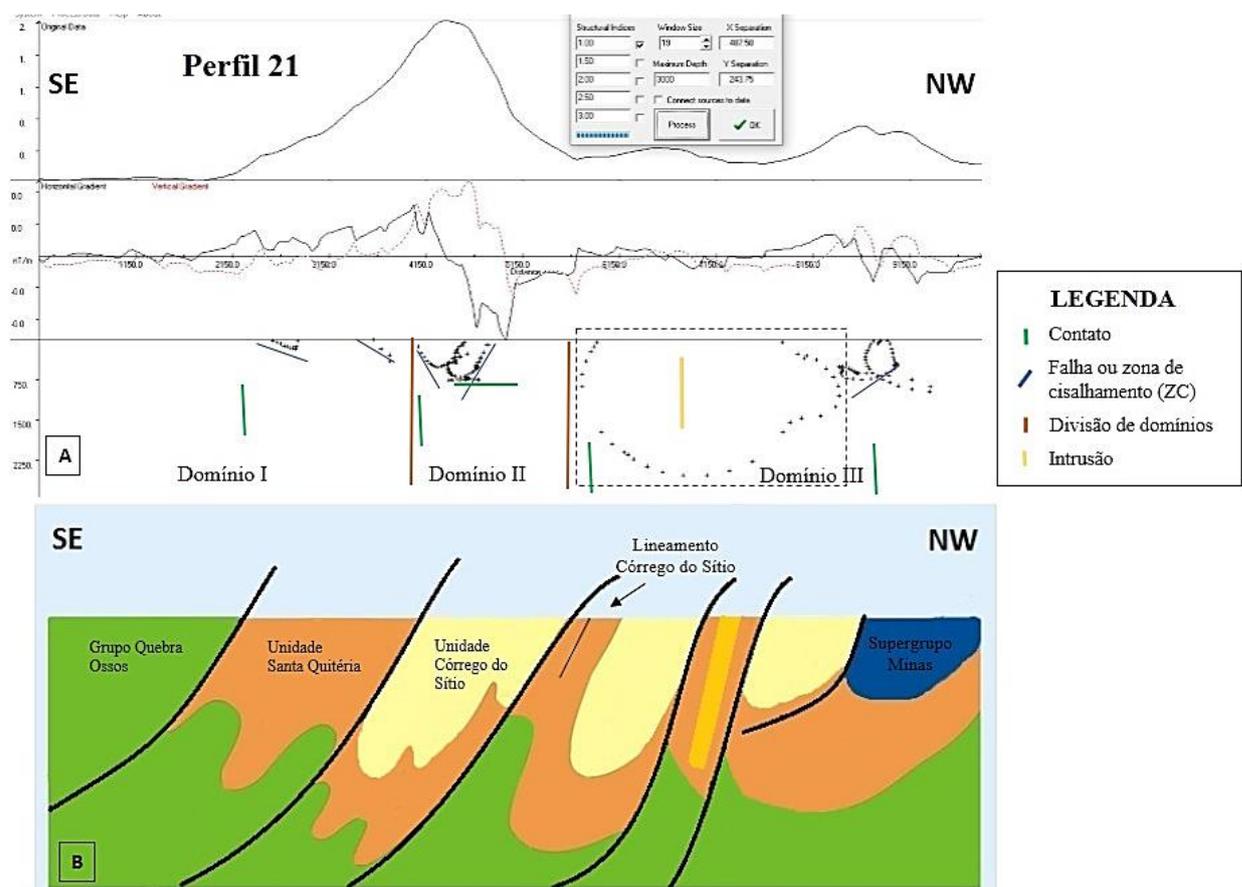


Figura 6.15 - Interpretação das anomalias magnéticas do perfil 21, segundo pelo método da Deconvolução de Euler. A) Perfil de deconvolução de Euler orientado SE-NW, com indicação da interpretação das anomalias dividido em domínios; B) Perfil geológico esquemático (modificado de Lima 2012).

Com o resultado da krigagem e da imagem 3D, é possível estimar a continuidade de algumas estruturas em profundidade. Nessa área é possível denotar que não se trata de uma região que apresenta grandes profundidades das rochas do Grupo Nova Lima, do mesmo modo nas proximidades do lineamento Córrego do Sítio (Figura 6.16). As anomalias mais profundas coincidem com os contatos

tectônicos entre a unidade Córrego do Sítio com o Grupo Quebra Ossos, com a unidade Santa Quitéria e o Supergrupo Minas.

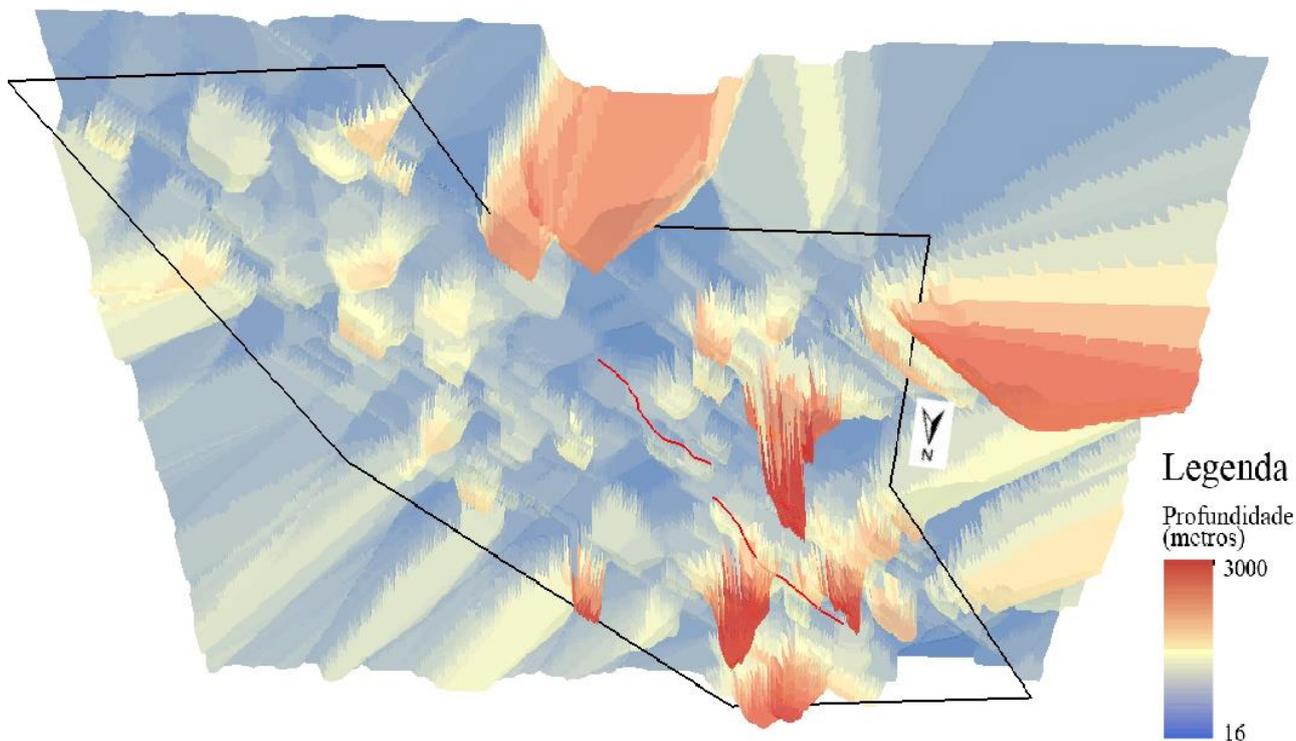


Figura 6.16 -Visualização inferior da imagem 3D do resultado da krigagem dos dados de deconvolução com a indicação de localização do lineamento Córrego do Sítio.

Na Figura 6.17 é possível visualizar a imagem 3D de vários ângulos para ter uma melhor identificação da geometria dos corpos. O quadro A orienta a visualização superior da imagem, evidenciando os pontos onde ocorrem as anomalias mais profundas, na cor vermelha, com aproximadamente 3000m de profundidade e linhas com tendências principais NE-SW e NW-SE. As demais imagens apresentam uma visada inferior, mostrando a geometria estimada. A vista inferior reforça o reconhecimento da tendência de orientação NE-SW, que é coincidente com as principais estruturas, como o lineamento Córrego do Sítio, as Falhas de Fundão, Alegria e Água Quente, a orientação dos eixos dos sinclinais e anticlinais, e com as zonas de cisalhamento que marcam por muitas vezes os contatos litológicos.

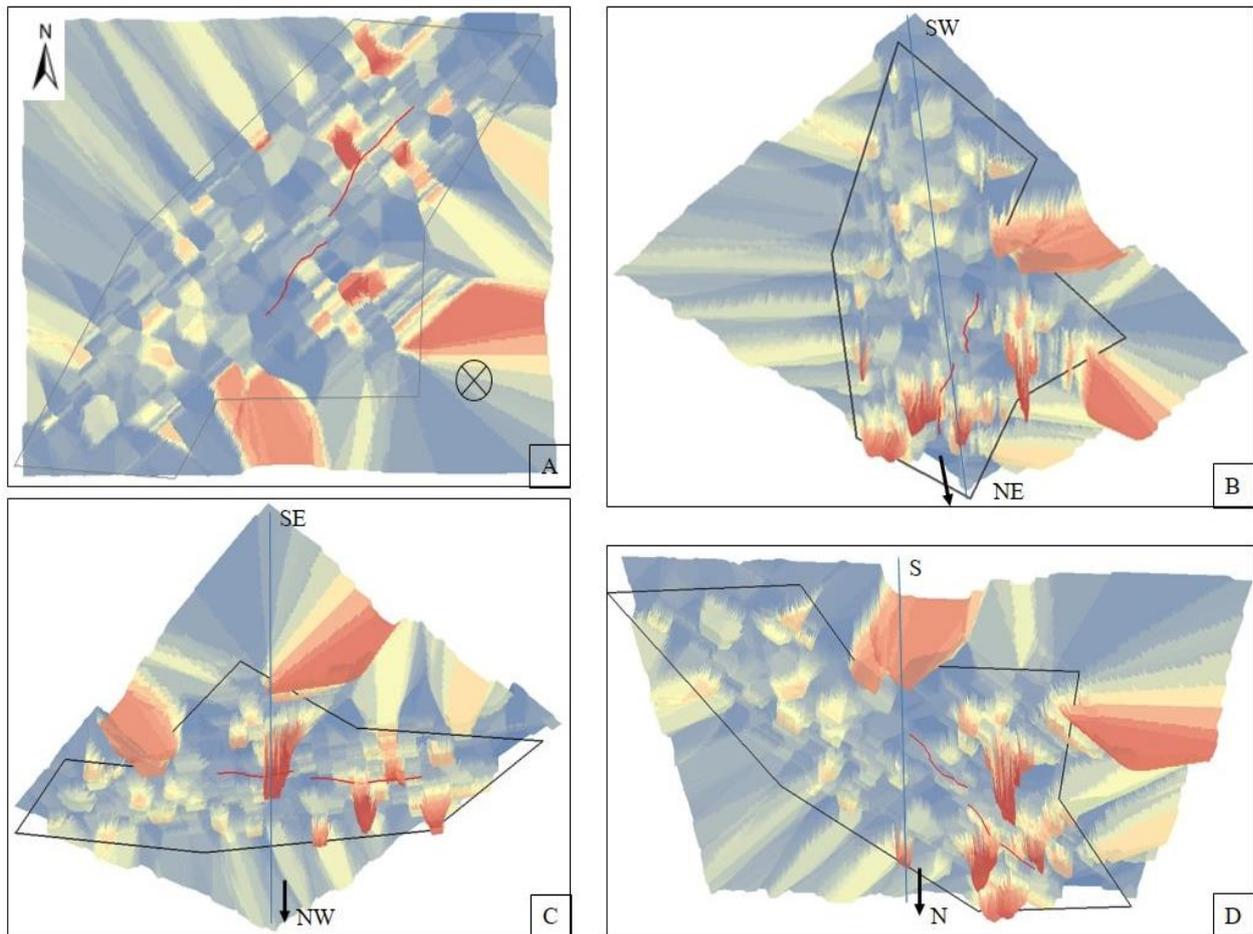


Figura 6.17 – Resultado da Krigagem em visualização 3D de diferentes ângulos de projeção (legenda de escala de cores na figura 6.16). A) Vista superior. B) Vista inferior de eixo NE-SW. C) Vista inferior de eixo NW-SE. D) Vista inferior de eixo N-S.

Observa-se que os diques, apesar de não ter uma resposta tão bem marcada nos resultados de deconvolução, apresenta uma contribuição significativa nas anomalias e identifica-se que estão inseridos em uma porção bastante profunda, indicada sua localização pelas setas amarelas na Figura 6.18, entretanto essa anomalia não apresenta continuidade lateral, apenas continua em profundidade local.

Além disso, a Figura 6.19 apresenta as anomalias caracterizadas anteriormente (Figura 6.2). Em nenhum posicionamento em que elas estão ocorre uma grande profundidade, e não expressa também continuidade de um corpo, como esperado na anomalia V, dado que todas as análises realizadas demonstram anomalias positivas para a área.

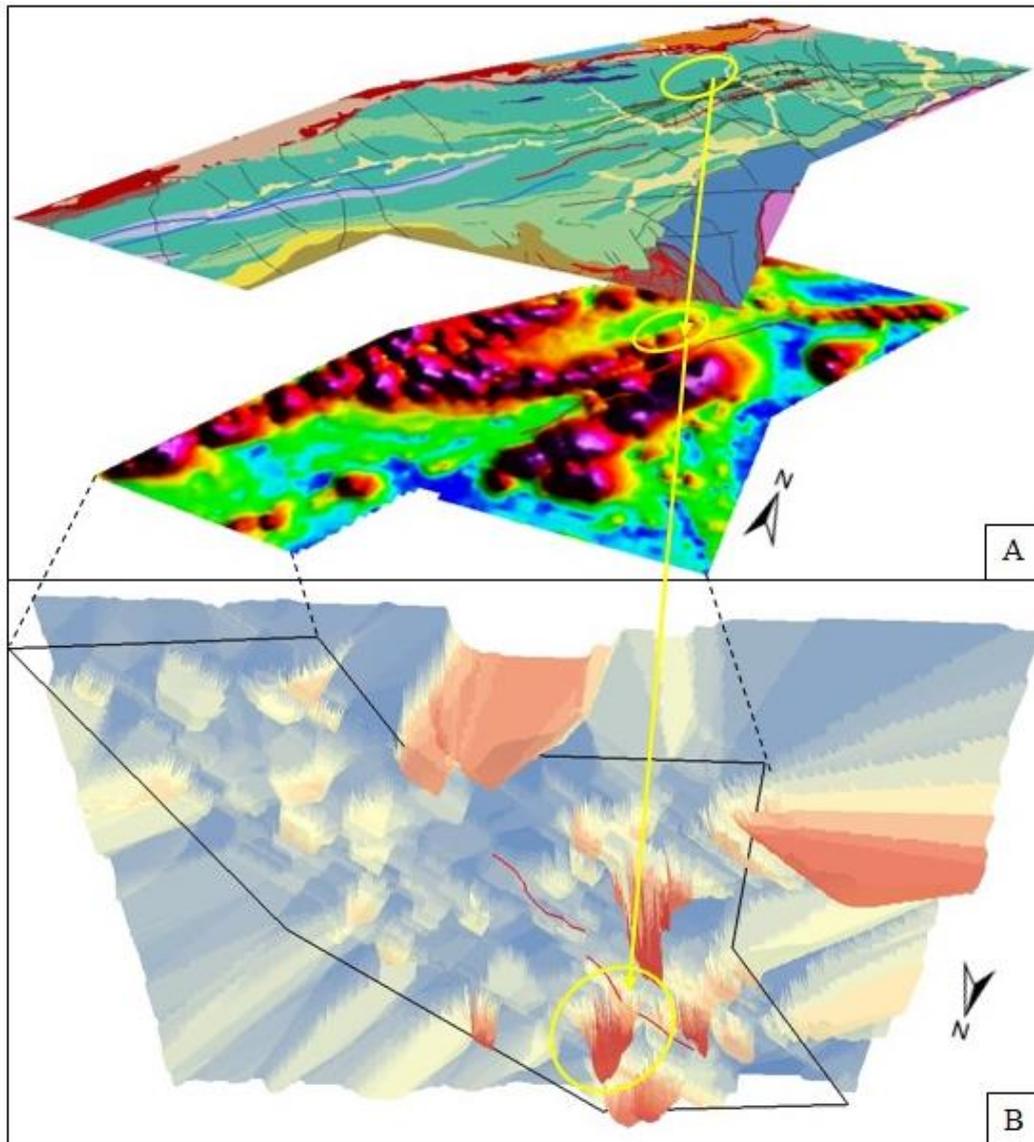


Figura 6.18 - Integração dos mapas geológico e magnetométrico com o resultado da krigagem ressaltando a anomalia circulada em amarelo. A) Mapa geológico sobreposto ao mapa geofísico de amplitude de sinal analítico. B) Mapa resultante da krigagem dos dados de deconvolução com vista inferior (legenda da escala de cores na figura 6.16).

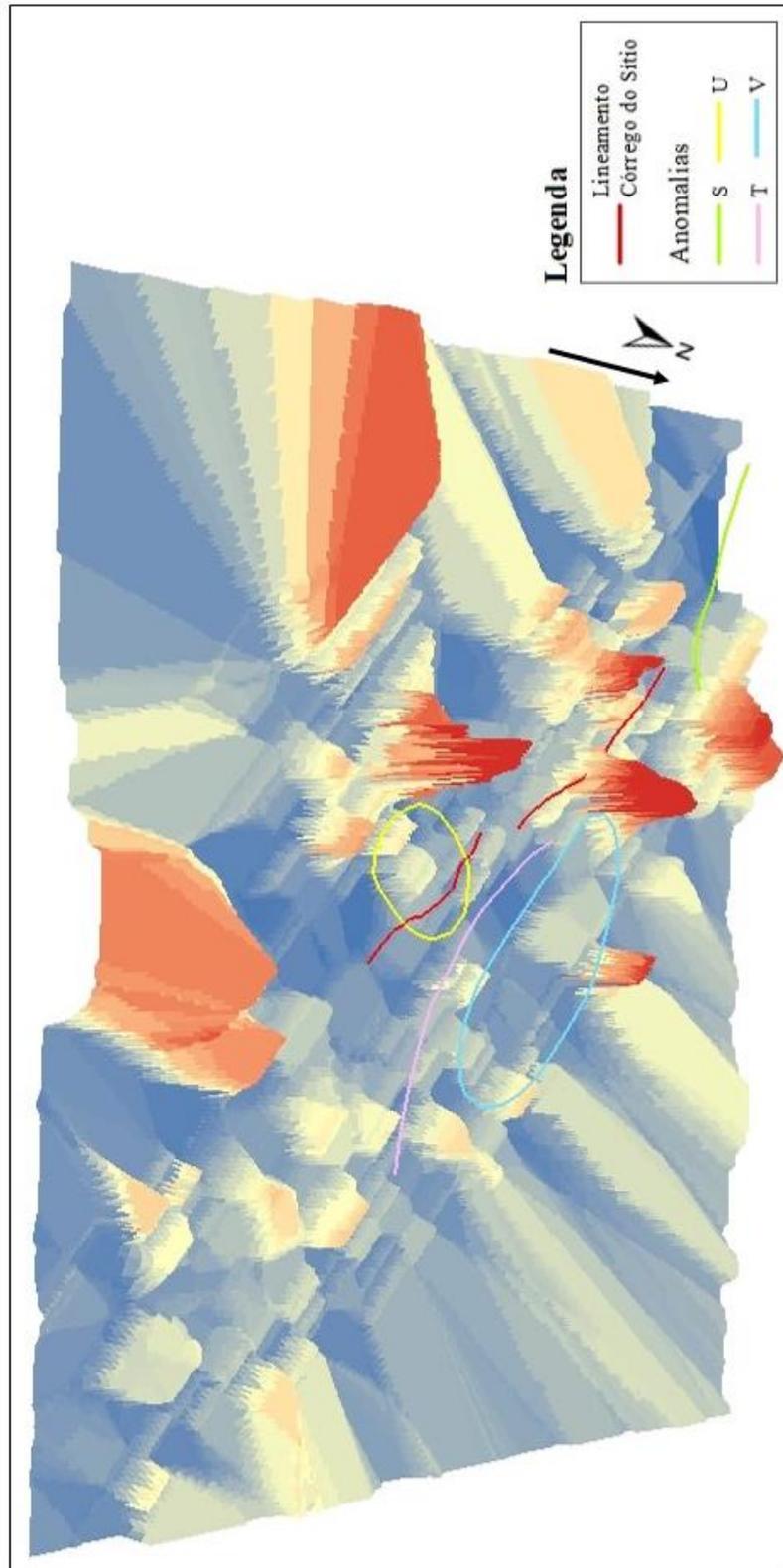


Figura 6.19 – Anomalias caracterizadas sobre a imagem 3D de krigagem (legenda da escala de cores na figura 6.16).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível demonstrar, a partir de métodos geofísicos, o comportamento em subsuperfície do lineamento Córrego do Sítio e da região na qual está inserido. Os bancos de dados utilizados se apresentaram satisfatórios para o desenvolvimento deste estudo, todavia, vale ressaltar que as informações fornecidas pelo banco de dados gravimétricos terrestre utilizados não foram suficientes para complementar a interpretação pelo método de Deconvolução de Euler para a gravimetria, como proposto inicialmente.

A análise qualitativa magnetométrica e radiométrica permitiu a determinação das principais fontes de anomalias de alta amplitudes e regiões com maior potencial de investigação mais detalhada, enquanto a análise gravimétrica apresentou um olhar que possibilitou perceber que a região exibe uma distribuição de densidade em função de um comportamento de compensação isostática local.

A caracterização dos lineamentos geofísicos e morfoestruturais verificaram uma correlação entre eles, com a direção preferencial N-S presente na resposta dos três métodos geofísicos, correspondentes à orogênese Brasileira, sendo essa orientação perpendicular à vergência do movimento do evento. Além disso, os lineamentos indicam uma forte remanescência nas estruturas do evento geológico Transamazônico na região, salientadas pela direção NW presentes nas análises qualitativas dos três métodos. Essa feição respalda o conjunto de estruturas geológicas configuradas no evento D2, que sofreram reativação no último evento Brasileiro. A direção NE-SW, que é a de orientação dos lineamentos principais, não se mostrou muito marcante na análise dos lineamentos geofísicos, exceto bem visível na análise radiométrica.

A Deconvolução de Euler permitiu verificar que, em geral, a região não apresenta grandes profundidades, em especial no entorno do Lineamento Córrego do Sítio, e não apresentou novidades quanto aos topos das anomalias, dado que a maioria se apresentam bem próximas à superfície e nas regiões de contatos litológicos. O modelo 3D gerado a partir da interpolação por krigagem valida esse ponto, de que para o lineamento Córrego do Sítio, o método quantitativo não determinou uma profundidade bem definida da estrutura, mas indica que ela não seja muito profunda, e que as anomalias mais profundas ocorrem nas porções de contato do Grupo Quebra Ossos com a unidade Santa Quitéria, onde ocorre o enxame de diques e a norte da área onde aflora a unidade Córrego do Sítio.

Neste trabalho, observaram-se duas principais áreas que apresentam um potencial de investigação de maior detalhamento, identificadas como anomalias V e T. Essas duas áreas apresentaram anomalias magnéticas positivas e fortes indícios de hidrotermalismo verificados pelos mapas

radiométricos, principalmente pelo fator F. A anomalia V apresenta uma resposta de deconvolução observadas no perfil 21 que indica a presença de uma estrutura de profundidade mais elevada em relação à região, e a anomalia T possui uma tendência de ser uma extensão de lineamentos da região, como o Córrego do Sítio ou São Bento. A porção sul da área também apresentou anomalias positivas nos mapas magnetométrico, radiométricos e gravimétrico, porém não identificou estruturas expressivas nas respostas de deconvolução. Nessa porção encontram-se o Sinclinal Ouro Fino e o Anticlinal Conceição, o que pode ser sugerido um estudo mais detalhado de mapeamento geológico para conexão entre essas estruturas e o lineamento Córrego do Sítio, bem como o potencial econômico devido ao forte indício de ação hidrotermal.

Foi possível demonstrar com este trabalho que essa região é de uma grande complexidade estrutural, necessitada de maiores estudos e de potencial econômico ainda a ser explorado, sendo uma sugestão de complementação da pesquisa, uma averiguação de todo Bloco 4 para melhor caracterização geofísica das estruturas e, assim, uma maior contribuição e informações para a área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F. F., Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29–58
- Almeida F. F. M. 1977. O Cráton São Francisco. *Revista Bras. Geociências* 7, 349-364
- Almeida F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozoico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16:325-349.
- Almeida, F.F.M., 1976. Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro. 29th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Ouro Preto, pp. 201–202.
- Baltazar O.F. & Silva, S.L. 1996. Projeto Rio das Velhas. Mapa Geológico Integrado do Supergrupo Rio das Velhas, em escala 1:100.000. DNPM/CPRM, Brasília.
- Baltazar O.F. & Zucchetti M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas *greenstone* belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32(3-4):471-499.
- Barbosa V. C. F. & Silva J. B. C. 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial. *Rev. Bras. Geof.*, 23(3):243-250.
- Blakely R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*. Cambridge, Cambridge University Press. 441p.
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A., Endo, I., 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: um modelo. *Pesquisas* 18 (2), 104–127.
- COOPER, G. R. J.; COWAN, D. R., 2008. Edge enhancement of potential field data using normalized statistics. *Geophysics*. vol. 73, no. 3, H1–H4
- Dentith, M., Mudge, S. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, 2014.
- Dorr II J.V.N., Gair J.E., Pomerene J.B., Rynearson G.A. 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Fomento da Produção Mineral, Avulso vol. 81, 31 p.
- Dorr II J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil U.S. Geological Survey Professional Paper, 614(A):1-110.
- Endo I. 1997. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozoico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais – São Paulo. *Int. de Geociências*, Universidade de São Paulo, São Paulo, 243p.
- Farina, F., Albert, C., Dopico, C. M., Gil, C. A., Moreira, H., Hippertt, J. P., Cutts, K., Alkmin, F. F., Lana, C. 2016. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, 68: 4-21.
- Gair, J.E., 1962. Geology and ore deposit of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. United States Geological Survey Professional Paper 341-A. 67 pp
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.*, 13:7-27.
- Halliday D., Resnick R., Walker J. 1996. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*. Tradução Azevedo A. S., & Azevedo J. P. S., Rio de Janeiro. 281p.
- Hildenbrand, J.D., Gama, M. F. P., Borges, A. J., Paulino, J., Marino, O. J. 1992. Levantamento aéreo magnetométrico, gamaespectométrico e eletromagnético - Projeto Rio das Velhas. Relatório Final, V1. DNPM / Prospec S/A.
- Kearey P., Brooks, M. & Hill I. 2009. *Geofísica de Exploração*. Tradução de Coelho M. C. M., São Paulo. 262p.

- Lana, C. Alkmim, F. F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R. Nalini Jr, H. A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research* 231: 157– 173.
- Lima L.C, 2012. Depósito lode Au-As-Sb Laranjeiras, em metaturbitos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 306 p.
- Lobato L.M., Santos J.O.S, McNaughton N.J., Fletcher I.R., Noce C.M. 2007. U-Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits, Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geol. Rev.*, 32:674-680.
- Luiz J. G. & Silva, L. M. C. 1995. Geofísica de Prospecção. CEJUP, Belém, 311p.
- Madeira, T. J. A. 2016. Análise Geofísica e estrutural da zona de cisalhamento São Vicente, Quadrilátero Ferrífero, Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG.
- Miller, H. G., Singh V. 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3): 213-217.
- Muniz, E. S. 2017. Mapeamento geológico de campo em escala 1:10.000 no contexto de um projeto de exploração mineral do tipo Brownfield, região da mina de Córrego do Sítio I, Santa Bárbara – MG. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Minas Gerais.
- Musset, A. E., Khan, M.A. 2001. Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics. Cambridge University Press. 470pp.
- Oliveira, D. S. de, 2014. Interpretação de dados aerogeofísicos para exploração aurífera na área do Projeto Córrego do Sítio, NE do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP). São Paulo, 2014.
- O'Rourke J.E. 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Teses de Doutorado, University of Winsconsin, 106 pp.
- Pereira, M.A.S, Lobato, L. M., Rosière, C. A., Silva, R. C. F. 2013. Classificação dos veios quartzo-carbonáticos de depósitos auríferos no lineamento Córrego do Sítio, QFe, MG. *Geonomos*, 21(2), 53-71.
- Porto C.G. 2008. A mineralização aurífera do depósito Córrego do Sítio e sua relação com o enxame de diques metamáficos no corpo Cachorro Bravo - Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 117 p.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I. W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55: 80–91.
- Roest, W. R, Verhoef, J. & Pilkington, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1):116-125.
- Roncato Jr. J. G. 2016. Evolução de turbiditos e sua mineralização aurífera no lineamento Córrego do Sítio e área Cuiabá-Lamego, Supergrupo Rio das Velhas: gequímica, geocronologia e in situ LA-ICP-MS em sulfetos. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- Ribeiro, V. B., Mantovani, M. S. M., Louro, V. H. A. 2013. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *TERRÆ DIDÁTICA* 10:29-51 2013
- Sartorato, G., B. 1998. Análise estatística de lineamentos extraídos de imagem LANDSA T-TM da porção Norte do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociências. Campinas, SP.
- Salem, A. and Ravat, D. (2003) A Combined Analytic Signal and Euler Method (AN EUL) for Automatic Interpretation of Magnetic Data. *Geophysics*, 68 (6), 1952-1961.
- Schorscher H.D. 1978. Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Soc. Bras. Geol., Recife, pp. 292-293.
- Silva, G. M. 2015. Análise geofísica do distrito diamantífero Abaeté (MG) e de suas possíveis fontes primárias. Contribuições às Ciências da Terra. Série M, v. 74. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto-MG.

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

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

Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Raposo, F.O., 1996. Estratigrafia. In: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Rio das Velhas–Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM– Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 13–42

Acessos de sites:

BNDG, 2018. <http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/padros-tecnicos-para-envio-de-dados-a-anp/bndg-banco-nacional-de-dados-gravimetricos> (acessado em 20/03/2020)

CPRM, 2017. <http://cprm.gov.br/publique/Noticias/CPRM-libera-gratuitamente-dados-gravimetricos-terrestres-adquiridos-entre-2012-e-2016-e-dados-de-aerolevantamentos-hiperespectrais-4690.html> (acessado em 20/03/2020).